

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

Doc. Ing. František Šolc, CSc.

ROBOTIKA, MODELOVÁNÍ A ŘÍZENÍ ROBOTŮ

ROBOTICS, MODELLING AND CONTROL OF ROBOTS

TEZE PŘEDNÁŠKY KE JMENOVÁNÍ PROFESOREM
V OBORU „TECHNICKÁ KYBERNETIKA“



BRNO 2004

KLÍČOVÁ SLOVA

robotika, průmyslové roboty, mobilní roboty, modelování robotů, řízení robotů, nelineární systémy, linearizace

KEY WORDS

robotics, industrial robots, mobile robots, robot modelling, robot control, nonlinear systems, linearization

OBSAH

1 ÚVOD	5
2 STACIONÁRNÍ ROBOTY	6
2.1 Kinematika průmyslových robotů	7
2.2 Dynamika průmyslových robotů	8
2.3 Řízení průmyslových robotů.....	10
2.3.1 Decentralizované řízení	10
2.3.2 Centralizované řízení momentu	11
2.3.3 Řízení pomocí inverzní dynamiky, zpětnovazební linearizace	12
2.3.4 Adaptivní řízení.....	13
3 MOBILNÍ ROBOTY	14
3.1 Kolové roboty	15
3.1.1 Kinematický model kolového robota.....	16
3.1.2 Dynamický model diferenciálně řízeného robota	16
3.2 ŘÍZENÍ MOBILNÍCH ROBOTŮ	18
3.2.1 Diferenciálně řízený robot s využitím zpětnovazební linearizace.....	18
3.2.2 Fotbalový robot řízený v potenciálovém poli.....	20
4 ZÁVĚR.....	21
5 PERSPEKTIVY OBORU A ROZVOJ STUDIA OBORU	22
6 VLASTNÍ PŘÍNOS ROZVOJI OBORU	24
7 LITERATURA.....	26

František Šolc se narodil v r. 1940 v Luběnicích u Olomouce. Středoškolské studium absolvoval na Průmyslové škole elektrotechnické v Brně. Po roční praxi konstruktéra v Leteckých opravách Olomouc byl přijat ke studiu na VAAZ Brno. Vysokoškolské studium absolvoval na Letecké fakultě VAAZ Brno v oboru Elektrická a speciální výstroj letadel v r. 1964 s vyznamenáním. Po absolutoriu pracoval na VAAZ do r. 1966 jako asistent. V r. 1966 přešel na Fakultu elektrotechniky Vysokého učení technického v Brně kde pracoval nejdříve jako výzkumný pracovník a od r. 1971 jako pedagogický pracovník. V r. 1977 obhájil kandidátskou práci na téma „Výpočet zátěže počítače automatického systému řízení leteckého provozu“. V r. 1986 byl jmenován docentem pro obor technická kybernetika. V r. 2003 obhájil habilitační práci na téma „Robot Modelling and Control“. K jeho odborným zájmům patří problematika automatického řízení, modelování dynamických systémů a robotika.

Od svého nástupu na VUT v Brně pracoval na řadě výzkumných úkolů. K nejdůležitějším patřily státní výzkumný úkol „Řízení mimoletištních letů“ a státní úkol „Zpracování optické informace“. Další výzkumné úkoly řešil v rámci HČ a byly vesměs zaměřeny do oblasti automatického řízení. Je úspěšným řešitelem grantu GAČR 101/93/2435 „Moderní metody řízení průmyslových robotů“, grantů FRVŠ „Laboratoř systémů a jejich řízení“ a „Deterministický chaos“. Výsledky výzkumu dosud publikoval celkem v 62 pracích z toho 19 v zahraničí. V současné době je řešitelem grantu GAČR GAČR 102/02/0782 „Výzkum chování a řízení netradičních akčních členů pro robotiku“ a nositelem výzkumného záměru CEZ: J22/98:26220012 „Výzkum informačních a řídicích systémů“ na FEKT VUT v Brně. Na FEKT VUT v Brně založil skupinu robotiky, která dosáhla významné výsledky v evropském a světovém měřítku. Pod jeho vedením vznikl první český fotbalový tým robotů, který získal titul mistra Evropy v roce 2001 a v r. 2002. Ještě významnějšího úspěchu dosáhla skupina robotiky pod jeho vedením na mistrovství světa v soutěži záchranných robotů, kde obsadila v mezinárodní prestižní první místo. Tyto výsledky vzbudily mimořádný zájem jak v odborných kruzích tak i v široké veřejnosti což je dokumentováno více jak 50 ohlasy ve všech druzích médií v tuzemsku i v zahraničí.

Během svého pedagogického působení na VUT v Brně prováděl výuku v oblasti automatického řízení, systémového inženýrství, spolehlivosti, modelování a identifikace a v poslední době v oblasti robotiky a CIM. Pedagogicky působil i v zahraničí. V letech 1969-1971 a 1972-1975 vyučoval na MEC v Káhiře, v r. 1989 vyučoval 3 měsíce na Walsall College of Technology, V. Británie. Navštívil řadu zahraničních univerzit University of Huddersfield, University of Salford (V. Británie), Katholieke Hogeschool vor Limburg (Belgie), Università La Sapienza Roma (Itálie), University of Maribor (Slovinsko), Vienna University of Technology (Rakousko), na kterých prezentoval výsledky své výzkumné a pedagogické činnosti formou vyzvaných přednášek.

Doc. Šolc je dlouholetým členem Committee on Robotics světové organizace IFAC, členem Českého komitétu pro automatizaci a členem IEEE. Od r. 1994 do r. 1999 zastával funkci vedoucího Ústavu automatizace a měřicí techniky FEI VUT v Brně.

1 ÚVOD

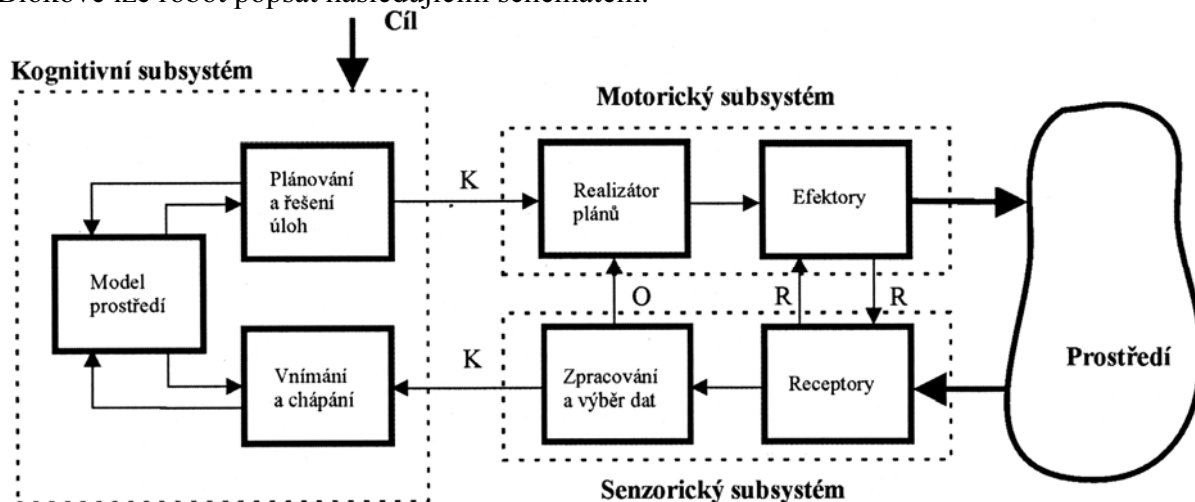
Robotika je obor, který se zabývá studiem a konstrukcí robotů a jim podobných zřízení. Dosud však neexistuje ustálená definice jak oboru tak pojmu robot. Všeobecně je robot chápán jako stroj, který vykonává podobné činnosti jako člověk, především však činnosti pohybové a manipulační. Většinou musí takový stroj získávat informace o prostředí ve kterém se pohybuje a musí být schopen toto prostředí fyzikálně, především mechanicky, ovlivňovat. Jako příklad mohou sloužit definice

(Encyklopedie Diderot, 2002). *Robot je programovatelný systém, který je schopen orientovaně vnímat a rozpoznávat prostředí, popřípadě manipulovat s předměty a pohybovat se.*

(Merriam-Webster Collegiate Dictionary, 1999). *Robot je: 1. Stroj, který vypadá jako lidská bytost a provádí různé úkony jako člověk např. chůze a řeč. 2. Automaticky řízený mechanismus.*

(Robot Institute of America, 1979). *Robot je programovatelný, multifunkční manipulátor navržený k přemísťování materiálů, nástrojů a dalších specializovaných zařízení pomocí programovatelných pohybů.*

Blokově lze robot popsat následujícím schématem.



Obr.1.1. Blokové schéma robota.

Robotika je moderní multidisciplinární obor zahrnující znalosti mechaniky, elektrotechniky, teorie řízení, měřicí techniky, umělé inteligence a celé řady dalších disciplin. Robotika je v současné době nejvíce propojena s oborem automatizace a může být chápána také jako snaha o automatizaci procesů a činností, které až dosud úspěšně vzdorovaly této snaze, jako např. manipulační činnosti.

První zařízení, dnes označovaná jako roboty, jsou zmiňována již v začátcích našeho letopočtu. Slovo robot je však známo od r. 1920 zásluhou bratří Čapků a objevuje se poprvé v jejich hře R.U.R. Celá historie robotiky a zřejmě i její dohledná budoucnost je spojena se snahou vytvořit umělou, pokud možno nebiologickou napodobeninu člověka. Při této snaze však postupně vzniká řada technicky a ekonomicky užitečných zařízení – robotů, které již dnes významně ulehčují člověku život. Mezi ekonomicky nejvýznamnější patří průmyslové roboty.

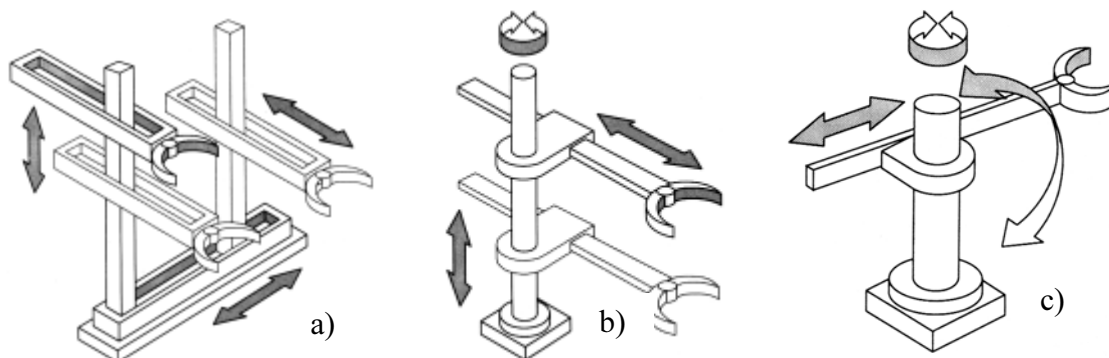
Průmyslové - stacionární roboty se objevily poprvé v USA v r. 1961 jako roboty Unimate a Versatran. Průmyslové roboty se stávají běžným prostředkem automatizace manipulačních operací především v automobilním průmyslu. Ročenka OSN uvádí v roce 2001 následující počty nasazených průmyslových robotů: 389 000 v Japonsku, 198 000 v Evropské unii a 90 000 v U.S.A.

V současné době se však do popředí výzkumu v robotice dostávají roboty mobilní, z nichž některé druhy začínají být rovněž ekonomicky zajímavé.

Následující text je věnován výkladu vybraných problémů modelování a řízení robotů jak z oblasti stacionárních robotů tak z oblasti mobilních robotů. Modelování a řízení robotů představuje významnou podoblast robotiky.

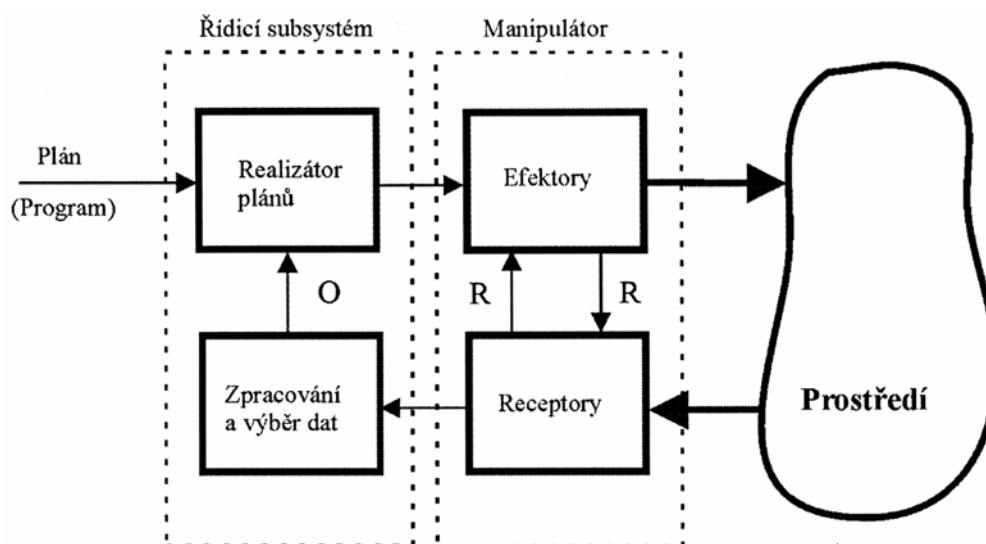
2 STACIONÁRNÍ ROBOTY

Většina průmyslových robotů jsou stacionární roboty. Mechanická část těchto stacionárních robotů – manipulátor, je v převážné míře tvořena otevřeným kinematickým řetězcem, který sestává z kinematických dvojic s jedním stupněm volnosti.



Obr.2.1. Základní kinematické koncepce ramen průmyslových robotů
a) kartézská, b) cylindrická, c) sférická

Blokové schéma průmyslového robota bývá jednodušší než je obecné schéma uvedené na obr. 1.1. Průmyslové roboty nejsou vybavovány kognitivním systémem. K jejich řízení postačuje program, který je do stroje vložen na základě znalostí technologie, kterou má robot obsluhovat.



Obr. 2.2. Blokové schéma průmyslového robota.

Základními problémy, které jsou u takových robotů řešeny z hlediska jejich řízení jsou problémy jejich modelů a to kinematického a dynamického (kinematiky a dynamiky), problémy plánování dráhy (programování) a samotné problémy automatického řízení robota po naprogramované dráze.

2.1 KINEMATIKA PRŮMYSLOVÝCH ROBOTŮ

Základní úlohou řešenou v kinematice průmyslových robotů je tzv. přímá úloha kinematiky, tj. nalezení vztahu mezi kartézskými souřadnicemi souřadnicových systémů jednotlivých kinematických členů (speciálně pak koncového členu) a kloubovými souřadnicemi robota. Vztah představuje zobrazení z prostoru kloubových souřadnic do prostoru kartézských souřadnic

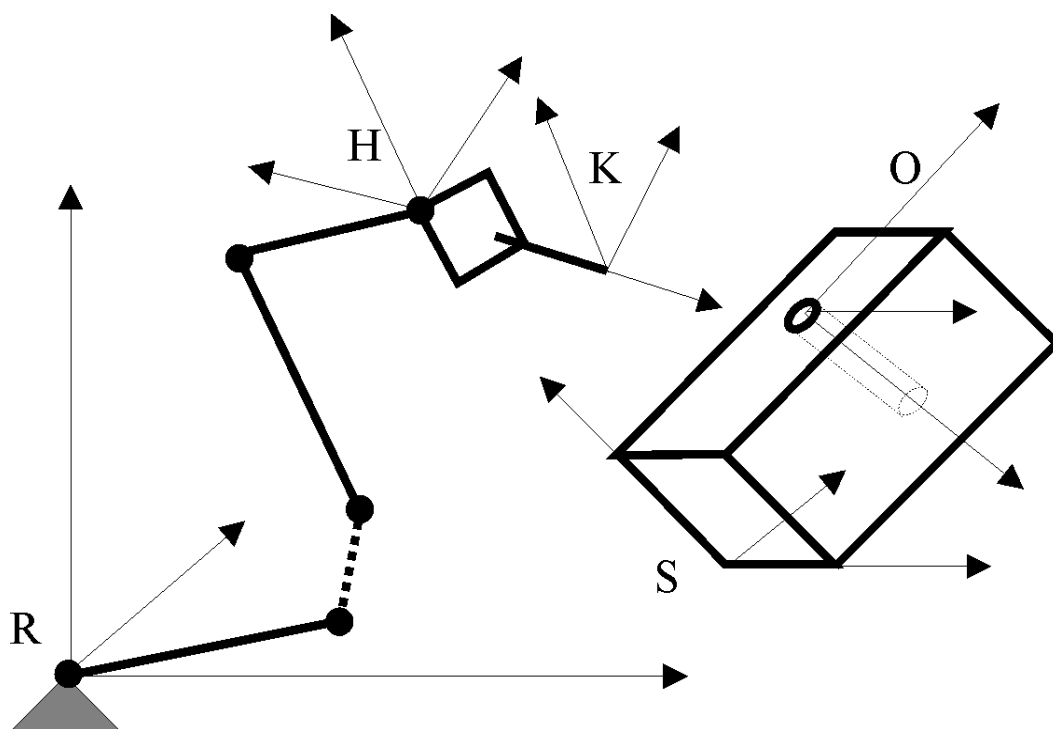
$$\mathbf{P} = \mathbf{f}(\mathbf{q}) \quad (2.1.)$$

Přímá úloha se systematicky řeší pomocí homogenní transformace mezi jednotlivými souřadnicovými systémy kinematických členů. Matice této homogenní transformace mají tvar

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{d} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \mathbf{H}^{-1} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}^T & -\mathbf{R}^T \mathbf{d} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

a jednotlivé prvky této matice jsou funkcemi kloubových souřadnic $q_1; q_2; \dots; q_n$. Matice homogenní transformace mezi rámem R a koncovým systémem K je jednoduše vyjádřena jako součin matic homogenní transformace mezi po sobě jdoucími členy

$$\mathbf{H}_{RK} = \mathbf{H}_{R1}(q_1)\mathbf{H}_{12}(q_2)\mathbf{H}_{23}(q_3) \dots \mathbf{H}_{n-1,K}(q_n) = \mathbf{H}_{RK}(\mathbf{q}) \quad (2.3)$$



Obr.2.3. K řešení kinematických úloh.

Druhou důležitou úlohou kinematiky průmyslových robotů je inverzní úloha kinematiky, výpočet kloubových souřadnic robota ze znalosti polohy a orientace koncového systému. Inverzní úlohu můžeme symbolicky zapsat jako

$$\mathbf{q} = \mathbf{f}^{-1}(\mathbf{P}) \quad (2.4)$$

Vzhledem k tomu, že obecně představuje inverzní úloha kinematiky řešení soustavy nelineárních rovnic, je její řešení podstatně složitější než řešení úlohy přímé. K analytickému řešení se používá metoda dekompozice, která většinou využívá speciální kinematické struktury zápěstí robota.

Řešení obou úloh je zapotřebí pro plánování dráhy robota, řízení robota a jeho případné kalibraci v pracovním prostoru. V některých případech musí být tato úloha řešena v reálném čase. V takovém případě je vhodné znát její analytické řešení.

2.2 DYNAMIKA PRŮMYSLOVÝCH ROBOTŮ

Základní rovnice dynamiky průmyslových robotů se nejčastěji získávají pomocí Lagrangeových rovnic. Model dynamiky kinematického řetězce bývá uváděn ve standardním tvaru soustavy diferenciálních rovnic 2. řádu.

$$\mathbf{H}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \mathbf{T} \quad (2.5)$$

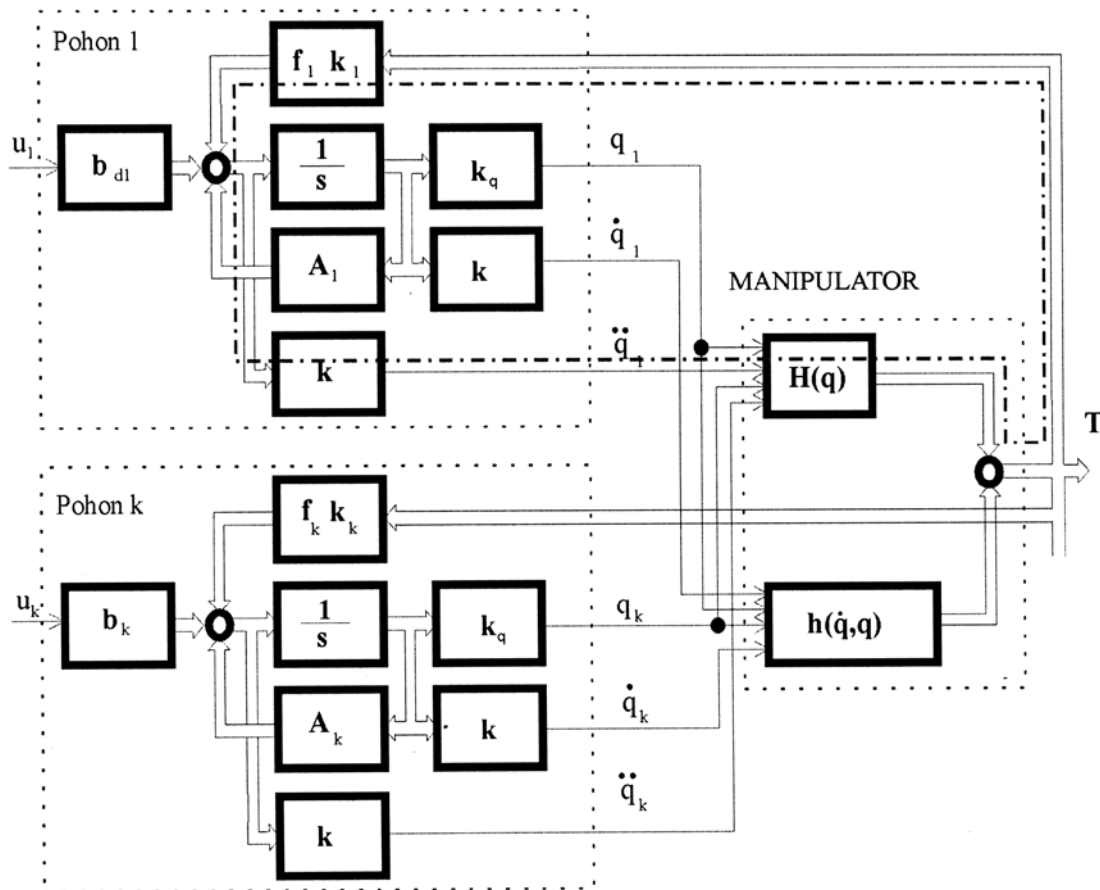
V rovnici představují jednotlivé členy součtu na levé straně síly setrvačnosti, síly odstředivé, síly Coriolisovy a síly gravitace. Na pravé straně jsou pak síly vyvíjené pohony v jednotlivých kloubech robota. Obtíže činí vytvoření kompletního modelu zahrnujícího jak dynamiku kinematického řetězce, tak dynamiku pohonů, která je v případě elektrických pohonů vyjádřena ve formě standardních stavových rovnic

$$\dot{\mathbf{x}}_k = \mathbf{A}_k \mathbf{x}_k + \mathbf{b}_k u_k + \mathbf{f}_k T_k \quad k=1,2,\dots,n \quad (2.6)$$

kde $\mathbf{x}_k = [q_k; \omega_k; i_k]^T$; q_k je kloubová souřadnice, ω_k je její rychlost a i_k je proud motoru. Jednotlivé matice pohonu v rovnici jsou

$$\mathbf{A}_k = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{B}{J_m} & \frac{C_m}{NJ_m} \\ 0 & -\frac{NC_e}{L_m} & -\frac{R}{L_m} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{b}_k = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ \frac{1}{L_m} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{f}_k = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ -\frac{1}{N^2 J_m} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Oba modely je možno klasickým způsobem vzájemně propojit a zakreslit do modelovacího schématu, které je uvedeno v následujícím obrázku



Obr.2.4. Celkové simulační schéma robota.

Při tomto klasickém postupu vznikne v modelovacím schématu řada algebraických smyček. Jedna z nich je ve schématu naznačena čerchovanou čarou. Některé simulační systémy vyžadují likvidaci těchto smyček. Podobně je obtížné klasickým způsobem získat model celého systému ve formě stavových rovnic. Výhodný se jeví maticový model získaný následujícím postupem. Model všech pohonů může být vyjádřen v maticové formě

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}_d \mathbf{x} + \mathbf{B}_d \mathbf{u} + \mathbf{F}_d \mathbf{T} \quad (2.8)$$

kde \mathbf{x} je celkový stavový vektor robota $\mathbf{x} = [x_1^T, x_2^T \dots x_n^T]^T$. \mathbf{A}_d ; \mathbf{B}_d and \mathbf{F}_d jsou diagonální matice pohonů $\mathbf{A}_d = \text{diag}(\mathbf{A}_1, \mathbf{A}_2 \dots \mathbf{A}_n)$; $\mathbf{B}_d = \text{diag}(\mathbf{b}_1, \mathbf{b}_2 \dots \mathbf{b}_n)$; $\mathbf{F}_d = \text{diag}(\mathbf{f}_1, \mathbf{f}_2 \dots \mathbf{f}_n)$.

Vektor \mathbf{q} kloubových souřadnic může být získán z celkového stavového vektoru \mathbf{x} pomocí separační matice $\mathbf{T}_q = \text{diag}(\mathbf{k}_q)$, kde $\mathbf{k}_q = [1, 0, 0]$. Platí

$$\mathbf{q} = \mathbf{T}_q \mathbf{x} \quad (2.9)$$

Podobně vektor rychlostí kloubových souřadnic může být získán pomocí separační matice $\mathbf{T}_\omega = \text{diag}(\mathbf{k}_\omega)$, kde $\mathbf{k}_\omega = [0, 1, 0]$. Platí tedy

$$\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{T}_\omega \dot{\mathbf{x}}; \quad \ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{T}_\omega \ddot{\mathbf{x}} \quad (2.10)$$

Rovnice dynamiky manipulátoru pak může být zapsána jako

$$\mathbf{H}(\mathbf{x})\mathbf{T}_\omega\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{h}(\mathbf{x}) = \mathbf{T} \quad (2.11)$$

V této rovnici pak dosadíme za \mathbf{T} z rovnice pohonů a po jednoduchých úpravách dostáváme

$$\dot{\mathbf{x}} = [\mathbf{I} - \mathbf{F}_d\mathbf{H}(\mathbf{x})\mathbf{T}_\omega]^{-1}[\mathbf{A}_d\mathbf{x} + \mathbf{B}_d\mathbf{u} + \mathbf{F}_d\mathbf{h}(\mathbf{x})] \quad (2.12)$$

Rovnici pak můžeme zapsat ve standardní stavové formě

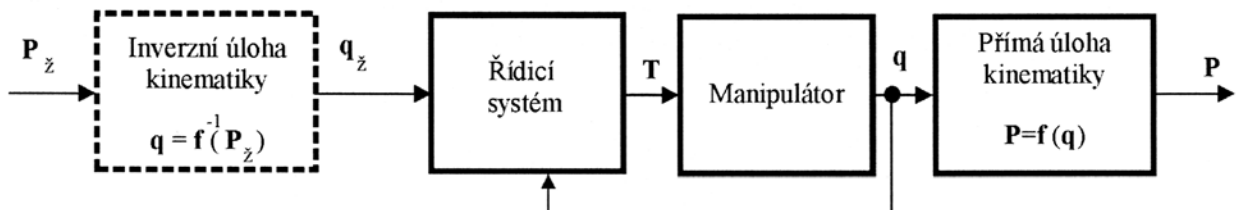
$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}_c(\mathbf{x}) + \mathbf{B}_c\mathbf{u} \quad (2.13)$$

$$\text{kde } \mathbf{A}_c = [\mathbf{I} - \mathbf{F}_d\mathbf{H}(\mathbf{x})\mathbf{T}_\omega]^{-1}[\mathbf{A}_d\mathbf{x} + \mathbf{F}_d\mathbf{h}(\mathbf{x})]; \quad \mathbf{B}_c = [\mathbf{I} - \mathbf{F}_d\mathbf{H}(\mathbf{x})\mathbf{T}_\omega]^{-1}\mathbf{B}_d$$

Tato rovnice – model pak může být snadno a systematicky použita pro simulaci robota, případně pro návrh řídicího systému robota.

2.3 ŘÍZENÍ PRŮMYSLOVÝCH ROBOTŮ

Základní architekturu řízení průmyslových robotů lze vyjádřit následujícím blokovým schématem. Požadovaná dráha $\mathbf{P}_z(t)$ robota je samozřejmě naplánována v kartézském - pracovním prostoru. Pro řízení robota je však přepočtena pomocí inverzní úlohy kinematiky do kloubového prostoru robota na požadovanou dráhu $\mathbf{q}_z(t)$. Většinou je výpočet inverzní úlohy kinematiky prováděn off-line, v některých případech však musí být prováděn v reálném čase on-line, např. je-li robot vybaven vnější optickou zpětnou vazbou a musí v reálném čase sledovat nedeterministicky se pohybující objekt.



Obr.2.5. Základní schéma řízení průmyslového robota.

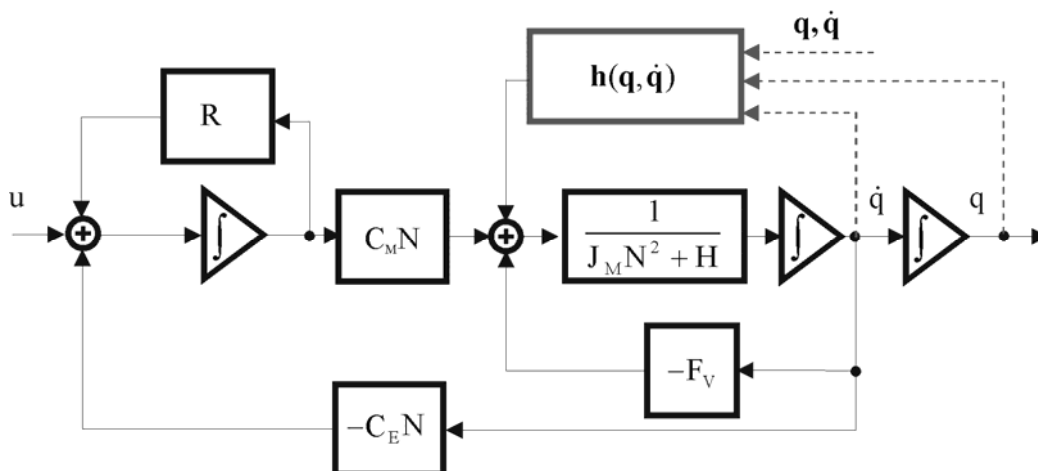
Zpětná vazba u této architektury je tedy vedena od kloubových souřadnic. Tento způsob řízení je možný za předpokladu dokonalé znalosti modelu přímé kinematiky manipulátoru.

2.3.1 Decentralizované řízení

V současné době nejčastěji v praxi používané řízení předpokládá, že vzájemné ovlivňování pohybů jednotlivých kinematických členů se projevuje v každém kloubu jako porucha, kterou dokáže řídicí systém efektivně potlačit a řídicí systém řídí pohyb v každém kloubu bez ohledu na toto vzájemné ovlivnění. Taková strategie řízení se nazývá lokální řízení a redukuje model manipulátoru na soustavu rovnic druhého řádu

$$H_k(\mathbf{q}^*)\ddot{q}_i + h_i(\mathbf{q}_i^*, \dot{q}_i) = T_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.14)$$

kde \mathbf{q}^* jsou vhodně zvolené kloubové souřadnice – vhodně zvolená pozice manipulátoru. Blokové schéma robota se pro návrh takového řídicího systému redukuje na schéma uvedené v následujícím obrázku.



Obr.2.6. Model robota (kloubu) pro decentralizované řízení.

Používaný zákon řízení pro takovou strategii je

$$u_i = K_{pi}(q_{zi} - q_i) - K_{vi}\dot{q}_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.15)$$

Koeficienty K_p a K_v musí být navrženy tak, aby chování celého systému bylo stabilní a všechna vlastní čísla linearizovaného modelu byla reálná. V takovém případě jsou náhodné poruchy vstupující do systému potlačeny bez překmitů. V literatuře je dokázáno, že takové řízení zaručuje stabilitu sledování žádané trajektorie.

2.3.2 Centralizované řízení momentu

U moderních strojů jsou používány elektrické pohony opatřené rychlou proudovou smyčkou, která významně zrychlí dynamiku takového pohonu. V takovém případě můžeme přepočítat momenty setrvačnosti a hmotnosti motorů na ekvivalentní parametry kinematických členů manipulátoru. Podobně můžeme přepočítat vizkozí tlumení pohybu stroje na ekvivalentní tlumení pohybu kinematického členu. Model robota pak můžeme psát ve tvaru

$$\mathbf{D}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{B}\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{g}(\mathbf{q}) = \mathbf{T} \quad (2.16)$$

kde $\mathbf{D}(\mathbf{q})$ je matice setrvačnosti manipulátoru, zahrnující i přepočtené momenty setrvačnosti motorů. Druhý člen na levé straně representuje Coriolisovy a odstředivé síly, třetí člen representuje síly vizkozího tření (včetně vizkozího tření motorů) a $\mathbf{g}(\mathbf{q})$ representuje vliv gravitace. Vektor \mathbf{T} je vektor momentů, kterými působí pohony v jednotlivých kloubech. Jeho jednotlivé složky jsou přímo úměrné žádané veličině \mathbf{u} regulátorů proudových smyček. Použijeme-li k řízení takového stroje opět strategii decentralizovaného řízení, bude pro každý pohon platit

$$\dot{\mathbf{x}}_i = \mathbf{A}_i \mathbf{x}_i + \mathbf{b}_i (\mathbf{k}_i \mathbf{x}_i + K_{pi} q_z) + \mathbf{f}_i T_i(\mathbf{x}) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.17)$$

kde $\mathbf{k}_i = [-K_{pi} \ -K_{vi}]$. Vyjádříme-li pohyb každého pohonu pomocí odchylky od žádané trajektorie $\Delta \mathbf{x}_i = \mathbf{x}_i - \mathbf{x}_{iž}$, dostaneme pomocí rovnic (2.6), (2.15) odchylkovou rovnici

$$\Delta \dot{\mathbf{x}}_i = \mathbf{A}_i \Delta \mathbf{x}_i + \mathbf{b}_i \mathbf{k}_i \Delta \mathbf{x}_i + [\mathbf{f}_i T_i(\mathbf{x}) + \mathbf{A}_i \mathbf{x}_{iž} + \mathbf{b}_i \mathbf{k}_i \mathbf{x}_{iž} + \mathbf{b}_i K_p q_{iž} - \dot{\mathbf{x}}_{iž}] \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.18)$$

Výraz mimo závorku na pravé straně rovnice určuje dynamiku zániku odchylky od trajektorie, výraz v hranaté závorce představuje poruchovou veličinu. To znamená, že i když robot zahájí pohyb s nulovou regulační odchylkou, bude žádaná trajektorie sledována s určitou chybou. Přesné a stabilní sledování trajektorie zaručíme, jestliže řídicí zákon doplníme tzv. nominálním řízením u_{ic} , které bude splňovat rovnici

$$\dot{\mathbf{x}}_{iž} = \mathbf{A}_i \mathbf{x}_{iž} + \mathbf{b}_i u_{ic} + \mathbf{f}_k T_i(\mathbf{x}_{ž}) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.19)$$

a upravíme zákon řízení na

$$u_i = u_{ic} + K_{pi}(q_{ži} - q_i) - K_{vi}(\dot{q}_{ži} - \dot{q}_i) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.20)$$

Odchylka od žádané trajektorie pak bude vyjádřena rovnicí

$$\Delta \dot{\mathbf{x}}_i = \mathbf{A}_i \Delta \mathbf{x}_i + \mathbf{b}_i \mathbf{k}_i \Delta \mathbf{x}_i + [\mathbf{f}_i T_i(\mathbf{x}) - \mathbf{f}_i T_i(\mathbf{x}_{ž})] \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.21)$$

Jestliže robot zahájí sledování trajektorie s nulovou odchylkou, bude sledování přesné a případná odchylka vzniklá náhodnou poruchou bude eliminována. Tento způsob řízení vyžaduje v podstatě výpočet momentů T_i z rovnice (2.19), který bude dodáván jako přímé řízení do jednotlivých kloubů, proto nese název *computed torque method*.

2.3.3 Řízení pomocí inverzní dynamiky, zpětnovazební linearizace

Za výše uvedeného předpokladu použití regulátorů s proudovou smyčkou je možné použít další sofistikované strategie řízení. Protože platí $\mathbf{T} = \mathbf{K}\mathbf{u}$ kde \mathbf{K} je diagonální matice zisků proudových – momentových smyček, můžeme rovnici (2.16) zapsat jako

$$\mathbf{D}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{B}\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{g}(\mathbf{q}) = \mathbf{K}\mathbf{u} \quad (2.22)$$

a pokusit se najít takové řízení $\mathbf{u} = \mathbf{f}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \mathbf{v})$, které zajistí, že taková uzavřená smyčka bude vzhledem k řízení \mathbf{v} představovat lineární systém. Takové řízení bude zajištěno když

$$\mathbf{u} = \mathbf{K}^{-1}[\mathbf{D}(\mathbf{q})\mathbf{v} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{B}\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{g}(\mathbf{q})] \quad (2.23)$$

Dosazením z (2.23) do (2.22) a vzhledem k tomu že $\mathbf{D}(\mathbf{q})$ je regulární matice dostaneme lineární systém,

$$\ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{v} \quad (2.24)$$

který představuje soustavu vzájemně se neovlivňujících systémů druhého řádu, pro které navrhne stabilizující řízení

$$\mathbf{v} = -\mathbf{K}_p \mathbf{q} - \mathbf{K}_v \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{r} \quad (2.25)$$

Matice \mathbf{K}_p a \mathbf{K}_v jsou diagonální matice stabilizujících zpětných vazeb. Jestliže navrheme \mathbf{r} jako

$$\mathbf{r} = \ddot{\mathbf{q}}_z + \mathbf{K}_p \mathbf{q}_z + \mathbf{K}_v \dot{\mathbf{q}}_z \quad (2.26)$$

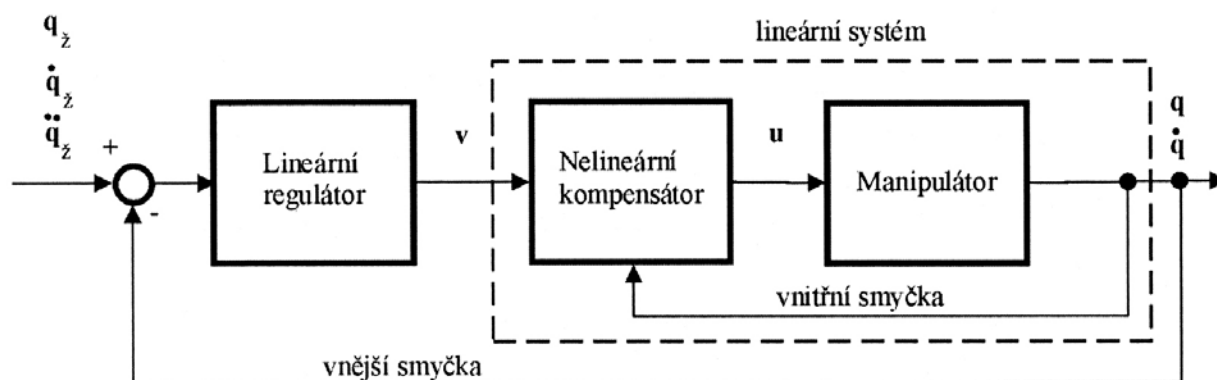
dostaneme pro odchylku $\mathbf{e} = \mathbf{q}_z - \mathbf{q}$ od žádané trajektorie \mathbf{q}_z rovnici

$$\ddot{\mathbf{e}} + \mathbf{K}_p \dot{\mathbf{e}} + \mathbf{K}_v \mathbf{e} = \mathbf{0} \quad (2.27)$$

což znamená, že případná regulační odchylka je stabilizujícím regulátorem postupně likvidována. Řízení \mathbf{u} má pak tvar

$$\mathbf{u} = \mathbf{K}^{-1} \{ \mathbf{D}(\mathbf{q})[\ddot{\mathbf{q}}_z + \mathbf{K}_p(\mathbf{q}_z - \mathbf{q}) + \mathbf{K}_v(\dot{\mathbf{q}}_z - \dot{\mathbf{q}})] + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{B}\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{g}(\mathbf{q}) \} \quad (2.28)$$

Blokové schéma takového řízení je uvedeno na následujícím obrázku.



Obr.2.7. Blokové schéma řízení s inverzní dynamikou.

Na obrázku je jasně vidět vnitřní smyčka, která systém zlinearizuje. Takové řízení proto nese také název řízení se zpětnovazební linearizací. Problémem u tohoto řízení je, že je zapotřebí provádět velmi složité výpočty v reálném čase a nutnost zajistit robustnost řízení při nepřesné znalosti modelu dynamiky manipulátoru.

2.3.4 Adaptivní řízení

Nepřesnosti v znalosti modelu manipulátoru a případné změny parametrů modelu mohou ovlivnit kvalitu řízení, které je prováděno neadaptivními strategiemi. Proto jsou u průmyslových robotů zkoumány rovněž adaptivní strategie řízení. Nejčastěji je používána strategie řízení s referenčním modelem. K jejímu popisu použijeme model robota ve tvaru (2.16), který nepatrně zjednodušíme.

$$\mathbf{D}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}_v(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{g}(\mathbf{q}) = \mathbf{T} \quad (2.29)$$

Budeme rovněž předpokládat, že akční veličina je vektor \mathbf{T} . Referenční model bývá lineární ve tvaru soustavy

$$\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{A}_{m1}\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{A}_{m0}\mathbf{q} = \mathbf{B}_m \mathbf{r} \quad (2.30)$$

Parametry modelu jsou většinou voleny tak, aby vlastní čísla lineárního modelu byla stabilní, reálná. Podle této rovnice se má robot chovat i na každé trajektorii, tedy i na žádané, kterou označíme indexem z tj. $\mathbf{q}_z(t)$, $\mathbf{r}_z(t)$ atd. Akční veličinu budeme počítat podle vzorce

$$\mathbf{T} = \mathbf{K}_p \mathbf{q} + \mathbf{K}_v \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{K}_r \mathbf{r} + \mathbf{T}_c \quad (2.31)$$

kde \mathbf{T}_c představuje kompenzační momenty. Z rovnice dynamiky (2.29) a z rovnice pro akční veličinu (2.31) můžeme vypočítat

$$\ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{D}^{-1}[\mathbf{K}_p \mathbf{q} + (\mathbf{K}_v - \mathbf{C}_v) \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{K}_r \mathbf{r} + (\mathbf{T}_c - \mathbf{g})] \quad (2.32)$$

S použitím rovnic (2.30) až (2.32) můžeme vyjádřit rovnici pro chování odchylek od žádané trajektorie $\mathbf{e} = \mathbf{q}_z - \mathbf{q}$.

$$\ddot{\mathbf{e}} + \mathbf{A}_{m1} \dot{\mathbf{e}} + \mathbf{A}_{m0} \mathbf{e} = -\mathbf{D}^{-1}[(\mathbf{K}_p + \mathbf{D}\mathbf{A}_{m0})\mathbf{q} + (\mathbf{K}_v - \mathbf{C}_v + \mathbf{D}\mathbf{A}_{m0})\dot{\mathbf{q}} + (\mathbf{K}_r - \mathbf{D}\mathbf{B}_m)\mathbf{r}_z + (\mathbf{T}_c - \mathbf{g})] \quad (2.33)$$

Je zřejmé, že pokud bude pravá strana identicky rovna nule, bude odchylka od trajektorie likvidována s dynamikou určenou referenčním modelem. Budeme tedy požadovat, aby zisky regulátoru vyhovovali podmínkám

$$\begin{aligned} \mathbf{K}_p &= -\mathbf{D}(\mathbf{q})\mathbf{A}_{m0} \\ \mathbf{K}_v &= \mathbf{C}_v(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) - \mathbf{D}(\mathbf{q})\mathbf{A}_{m0} \\ \mathbf{K}_r &= \mathbf{D}(\mathbf{q})\mathbf{B}_m \\ \mathbf{T}_c &= \mathbf{q}(\mathbf{q}) \end{aligned} \quad (2.34)$$

Protože je k výpočtu zisků regulátoru používán model robota musí být jejich hodnoty dokompenzovány zvláštním algoritmem, který používá k donastavení zisků odchylku od žádané trajektorie. Principiální schéma adaptivního regulátoru je nakresleno na obr.2.8.

3 MOBILNÍ ROBOTY

Mobilní robotika je v současné době představitelem robotiky jako takové. Hlavním rozdílem od robotiky zabývající se stacionárními roboty je zde problém pohybu a orientace v prostoru, který je mnohem větší než sám robot a je většinou nepozorovatelný z jednoho místa. V mobilní robotice se v plné míře objevuje rozsáhlost a multidisciplinárnost robotiky.

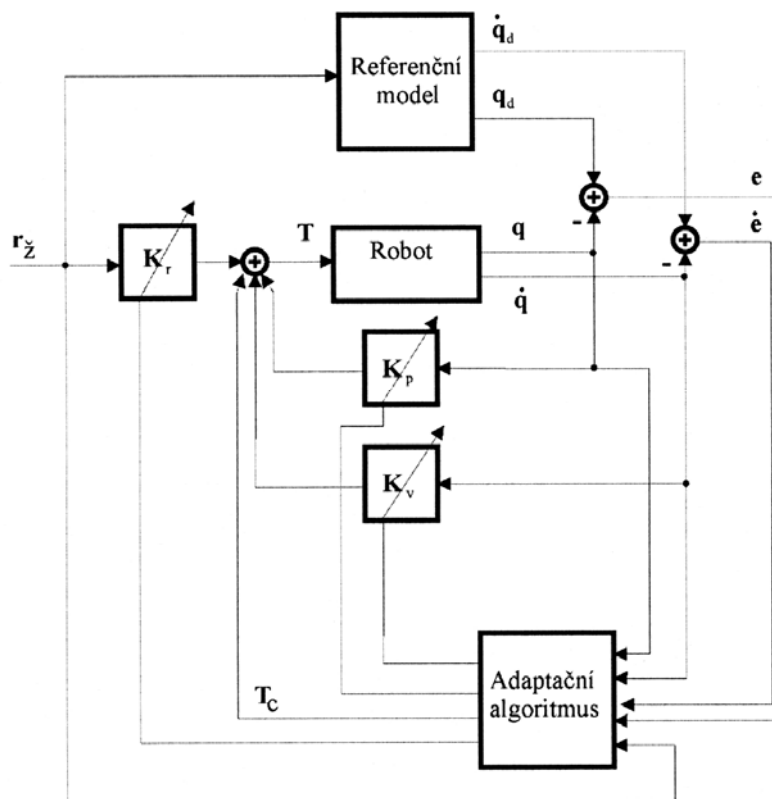
Mobilní roboty se rozdělují do kategorií především podle prostředí a principu, na jakém se pohybují. Podle prostředí jsou roboty děleny na pozemní, vodní, létající a vesmírné. V tomto textu jsou diskutovány pouze roboty pozemní.

Pozemní roboty dělíme podle principu pohybu (lokomoce) na roboty

- a) kolové
- b) pásové
- c) zooidní
- d) humanoidní

Humanoidní roboty se pohybují na stejném principu jako člověk, jde tedy o dvounohé kráčející stroje. Do zooidních robotů řadíme roboty, které se pohybují na stejném principu jako zvířata, hmyz, hadi apod. Jde většinou o kráčející roboty čtyřnohé, osminohé, roboty pohybující se plazením apod. Do třídy pásových robotů jsou zahrnovány roboty pohybující se na pásových

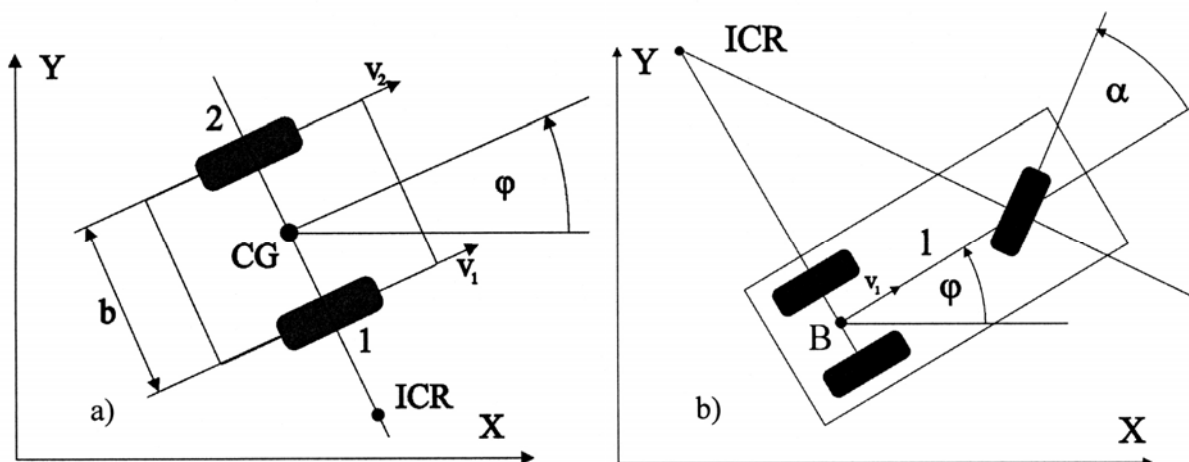
podvozcích a na podvozcích kolopásových. Nejrozšířenější třídou mobilních robotů jsou však roboty kolové, které k pohybu používají soustavy kol a nemají v přírodě analogii.



Obr.2.8. Schéma adaptivního řízení.

3.1 KOLOVÉ ROBOTY

Kolových robotů je mnoho druhů. Dva nejčastěji používané podvozky jsou nakresleny na následujícím obrázku



Obr.3.1. a) Diferenciálně řízený podvozek, b) Tříkolový podvozek.

Roboty s diferenciálně řízeným podvozkem jsou výrobně velmi jednoduché a jsou používány prakticky výhradně v laboratorním prostředí. Tříkolový podvozek je již podobný automobilovým podvozkům. Pro pohyb v terénu jsou používány podvozky automobilového typu nebo podvozky řízené smykem podobně jako pásové podvozky. Modely smykem řízených podvozků jsou značně složité a tyto stroje jsou proto řízeny téměř výhradně manuálně.

3.1.1 Kinematický model kolového robota

Modely většiny kolových podvozků předpokládají pohyb, při kterém kola neprokluzují ani v radiálním ani v axiálním směru. Tento předpoklad je splněn při pomalých pohybech a jestliže se osy otáčení kol protínají v okamžitém středu otáčení těla robota ICR. Za těchto předpokladů jsou modely pohybu výše uvedených robotů následující. Pro diferenciálně řízený podvozek, viz obr. 3.1, platí

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\varphi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.5 \cos \varphi \\ 0.5 \sin \varphi \\ \frac{1}{b} \end{bmatrix} v_1 + \begin{bmatrix} 0.5 \cos \varphi \\ 0.5 \sin \varphi \\ -\frac{1}{b} \end{bmatrix} v_2 \quad (3.1)$$

kde v_1 , resp. v_2 jsou obvodové rychlosti pravého resp. levého kola, x a y jsou souřadnice těžiště CG. Pro tříkolový robot z téhož obrázku platí

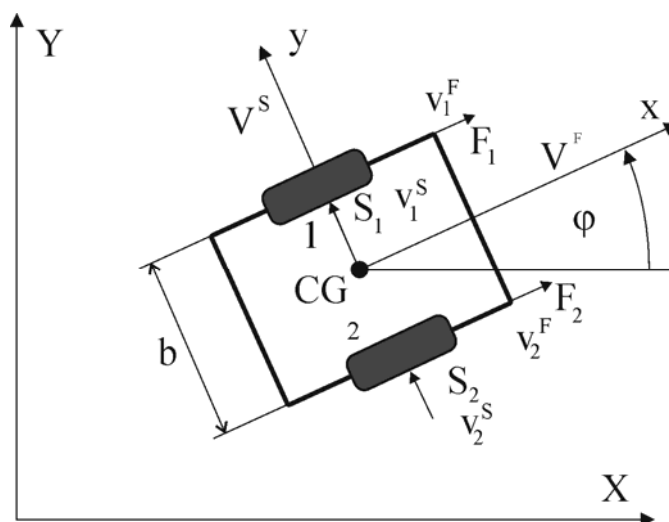
$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\varphi} \\ \dot{\alpha} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi \\ \sin \varphi \\ \frac{\tan \alpha}{l} \\ 0 \end{bmatrix} v_1 + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} v_2 \quad (3.2)$$

kde v_1 , resp. v_2 jsou rychlost bodu B zadní nápravy resp. rychlost řízení rejdového kola, x a y jsou souřadnice bodu B.

Výše uvedené modely jsou v podstatě kinematické modely mechaniky podvozků a pokud je dodržen předpoklad o tom, že kola v žádném směru neprokluzují, představují tzv. neholonomní omezení pohybu podvozku. Neholonomní omezení pohybu robota klade zvýšené nároky na složitost plánování dráhy robota, v našem případě v rovině. Robot sice může v rovině dosáhnout jakýkoliv stav, ale nemůže se do něj dostat jakýmkoliv způsobem. Obtížnost problému lze demonstrovat na paralelním parkování auta, případně parkování auta s přívěsem.

3.1.2 Dynamický model diferenciálně řízeného robota

V některých případech se může stát, že je potřeba brát v úvahu i dynamiku robota. Dynamické modely nejsou v současnosti běžné. Jejich potřeba nastává v případě rychlých pohybů při kterých může dojít k prokluzu kol. V dalším je popsán jednoduchý dynamický model diferenciálně řízeného robota.



Obr.3.2. Síly působící na diferenciálně řízený podvozek.

Pro rovinný pohyb robota platí

$$\begin{aligned}
 M\ddot{x} &= \sum_{i=1}^{i=2} F_i \cos \varphi - \sum_{i=1}^{i=2} S_i \sin \varphi \\
 M\ddot{y} &= \sum_{i=1}^{i=2} F_i \sin \varphi + \sum_{i=1}^{i=2} S_i \cos \varphi \\
 J\ddot{\varphi} &= (F_1 - F_2) \frac{b}{2}
 \end{aligned} \tag{3.3}$$

kde x, y jsou souřadnice těžiště, M je hmotnost robota, J je moment setrvačnosti robota vzhledem k těžišti F a S jsou podélné a stranové síly, které na robota působí. Pro otáčivý pohyb kol robota platí

$$\begin{aligned}
 J_w \dot{\omega}_1 &= T_1 - rF_1 \\
 J_w \dot{\omega}_2 &= T_2 - rF_2
 \end{aligned} \tag{3.4}$$

kde J_w jsou momenty setrvačnosti kol, ω je úhlová rychlost otáčení kol a T je krouticí moment vyvolávaný pohonnými motory. Pro podélné a stranové rychlosti robota platí kinematické vztahy

$$\begin{aligned}
 v_1^F &= \dot{x} \cdot \cos \varphi + \dot{y} \cdot \sin \varphi + \frac{b}{2} \dot{\varphi} \\
 v_2^F &= \dot{x} \cdot \cos \varphi + \dot{y} \cdot \sin \varphi - \frac{b}{2} \dot{\varphi} \\
 v_1^S &= v_2^S = -\dot{x} \cdot \sin \varphi + \dot{y} \cdot \cos \varphi
 \end{aligned} \tag{3.5}$$

Pro výpočet sil působících na robota lze použít Coulombův model tření mezi koly a podložkou. Pro síly na každém kole bude platit

$$\begin{aligned}
 F &= P \cos \alpha \\
 S &= P \sin \alpha
 \end{aligned} \tag{3.6}$$

kde

$$P = Cv \quad \text{pro } v \leq \frac{\mu_0 W}{C}$$

$$P = \mu_0 W \text{sign}(v) \quad \text{pro } v \geq \frac{\mu_0 W}{C}$$

a

$$\tan \alpha = \frac{v^S}{v^F} \quad v = \sqrt{(r\omega - v^F)^2 + (v^S)^2}$$

Ve vzorci je W tíha robota, μ_0 je koeficient tření mezi koly a podložkou a C je konstanta modelu Coulombova tření. Složitost tohoto modelu je již podobná složitosti smykem řízených podvozků.

3.2 ŘÍZENÍ MOBILNÍCH ROBOTŮ

Automatické řízení mobilních robotů představuje jednu z nejobtížnějších kapitol teorie řízení. Modely pohybu mobilních robotů představují z hlediska teorie řízení, podobně jako stacionární roboty, nelineární dynamické systémy. U všech druhů mobilních robotů se objevuje problém plánování jejich trajektorie v prostředí obsahující překážky. U kolových systémů navíc přistupují problémy s návrhem žádané trajektorie tak aby byly splněny omezující, neholonomní podmínky jejich pohybu. U kráčejících robotů je kritickým problémem udržení jejich stability. Řídicí systém se musí vyrovnat s jejich tendencí pádu v okamžiku když se jejich těžiště nachází mimo oblast stability, která je vymezena polygonem určeným polohou noh robota. U těchto typů robotů je tedy řešena problematika jejich statické stability, když jsou v klidu a dynamické stability, když jsou v pohybu. U kolových robotů je naopak důležitá otázka stability sledování trajektorie. Výzkum automatického řízení obou druhů robotů je stále se rozvíjející vědní oblast.

3.2.1 Diferenciálně řízený robot s využitím zpětnovazební linearizace

Předpokládáme, že chceme robota řídit po žádané dráze, která je zadána v ploše souřadnicemi $[x_z(t), y_z(t)]$. Z modelu diferenciálně řízeného robota je zřejmé, že platí

$$\dot{\mathbf{z}} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\varphi) & 0 \\ \sin(\varphi) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

kde $v = (v_1 + v_2)/2$ a $\omega = (v_1 - v_2)/b$. Z této rovnice je zřejmé, že ω neovlivňuje rychlost pohybu a nejsme schopni provést linearizaci přímo. Jestliže ale budeme rychlost v tvořit pomocí integrátoru, jehož stav označíme $\xi = v$, a který budeme řídit veličinou w , dostaneme

$$v = \xi \quad \dot{\xi} = w \quad \dot{\mathbf{z}} = \begin{bmatrix} \cos(\varphi) & 0 \\ \sin(\varphi) & 0 \end{bmatrix} \xi \quad (3.8)$$

Po derivaci poslední rovnice v (3.8) dostaneme

$$\ddot{\mathbf{z}} = \begin{bmatrix} \cos(\varphi) \\ \sin(\varphi) \end{bmatrix} \dot{\xi} + \begin{bmatrix} -\sin(\varphi) \\ \cos(\varphi) \end{bmatrix} \xi \dot{\varphi} = \begin{bmatrix} \cos(\varphi) & -\xi \sin(\varphi) \\ \sin(\varphi) & \xi \cos(\varphi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w \\ \omega \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

Matice systému (3.9) je regulární vyjma $\xi=0$. Až na nulovou rychlost robota můžeme tedy definovat

$$\begin{bmatrix} w \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\varphi) & -\xi \sin(\varphi) \\ \sin(\varphi) & \xi \cos(\varphi) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

a po dosazení do (3.9) dostat

$$\ddot{\mathbf{z}} = \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \mathbf{u} \quad (3.11)$$

což je již lineární dekomponovaný systém který dokážeme snadno řídit. Výsledné rovnice dynamického linearizačního kompenzátoru jsou

$$\begin{aligned} w = \dot{\xi} &= u_1 \cos(\varphi) + u_2 \sin(\varphi) \\ \omega &= \frac{u_2 \cos(\varphi) - u_1 \sin(\varphi)}{\xi} \\ v &= \xi \end{aligned} \quad (3.12)$$

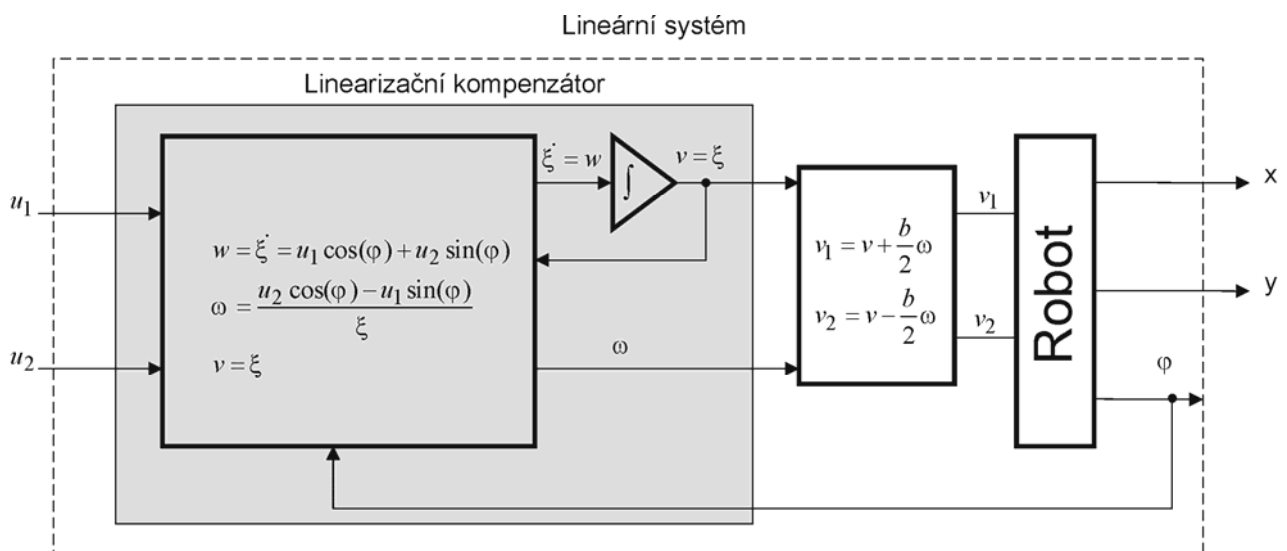
Ze znalosti hodnot v a ω lze již vypočítat vstupní přímé akční veličiny v_1 a v_2 .

$$\begin{aligned} v_1 &= v + \frac{b}{2} \omega \\ v_2 &= v - \frac{b}{2} \omega \end{aligned} \quad (3.13)$$

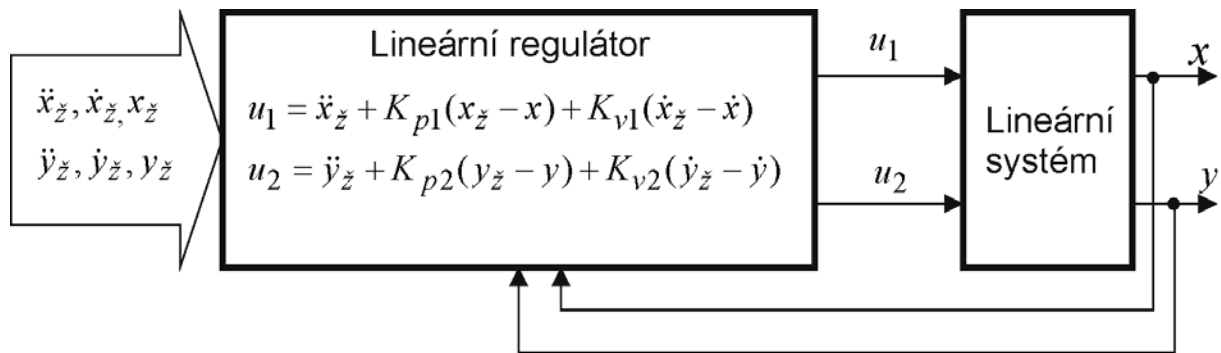
Linearizovaný systém je pak řízen klasickým lineárním stabilizujícím regulátorem

$$\begin{aligned} u_1 &= \ddot{x}_z + K_{p1}(x_z - x) + K_{v1}(\dot{x}_z - \dot{x}) \\ u_2 &= \ddot{y}_z + K_{p2}(y_z - y) + K_{v2}(\dot{y}_z - \dot{y}) \end{aligned} \quad (3.14)$$

Principiální schéma linearizace a celkové schéma řízení je nakresleno na následujících obrázcích.



Obr.3.3. Principiální schéma linearizace.



Obr.3.4. Celkové schéma řízení.

3.2.2 Fotbalový robot řízený v potenciálovém poli

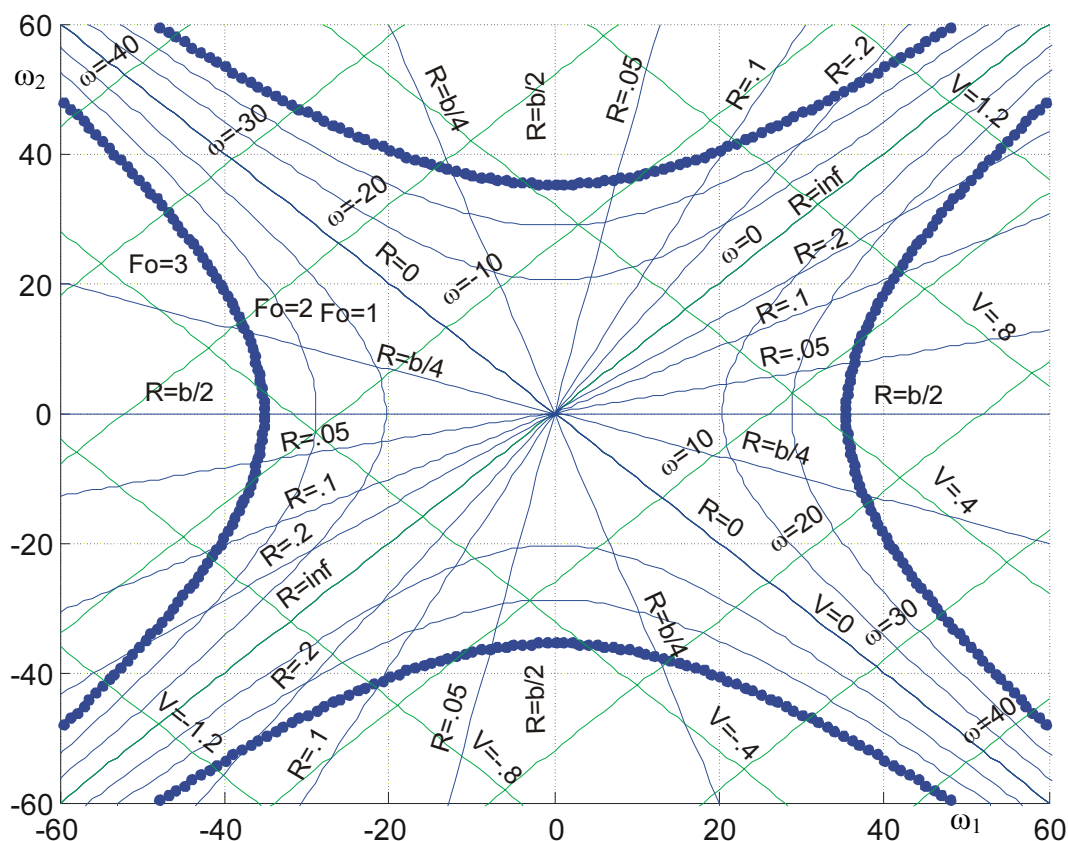
Výše uvedený způsob řízení diferenciálního podvozku je vhodný, pokud se robot pohybuje pomalu a je dosti času na plánování jeho dráhy. U fotbalových robotů, které se pohybují vysokou rychlostí v proměnlivém prostředí, se osvědčuje jednodušší způsob řízení s pomocí potenciálových polí. Potenciálové pole je vytvářeno herní strategií a robot se v něm má pohybovat ve směru záporného gradientu tak, že je např. přitahován míčem a odpuzován překážkami. Zákon řízení bývá v takovém případě poměrně jednoduchý, např.

$$\begin{aligned}\omega_z &= f_\omega(e) \\ v_z &= f_v(N(x,y))\end{aligned}\tag{3.15}$$

kde $N(x,y)$ je absolutní hodnota gradientu v bodě (x,y) a $e = \angle N(x,y) - \varphi$. $\angle N(x,y)$ je směr gradientu v bodě (x,y) . Při vysokých rychlostech robotů je však snadné dostat robota do smyku a ztratit nad ním kontrolu. K návrhu vhodného algoritmu řízení je možné použít tzv. výkonového diagramu robota, viz obr. 3.5, který získáme z jeho modelu. Ve výkonovém diagramu jsou na osách vyneseny úhlové rychlosti kol robota. Ty určují pro daný rozchod podvozku hmotnost robota, poloměr zatáčení robota R , rychlost robota V , úhlovou rychlost otáčení robota ω a odstředivou sílu F_o , jaká na robota působí.

$$\begin{aligned}F_o &= M \frac{(r\omega_1 + r\omega_2)(r\omega_1 - r\omega_2)}{2b} \\ V &= \frac{r\omega_1 + r\omega_2}{2b} \\ R &= \frac{b(r\omega_1 + r\omega_2)}{2(r\omega_1 - r\omega_2)}\end{aligned}\tag{3.16}$$

Zákon řízení pak musí být navržen tak, aby hodograf úhlových rychlostí kol vyplývajících z tohoto zákona ležel uvnitř přípustné oblasti dané maximální silou, kterou jsou kola schopna přenést.



Obr.3.5. Výkonový diagram robota.

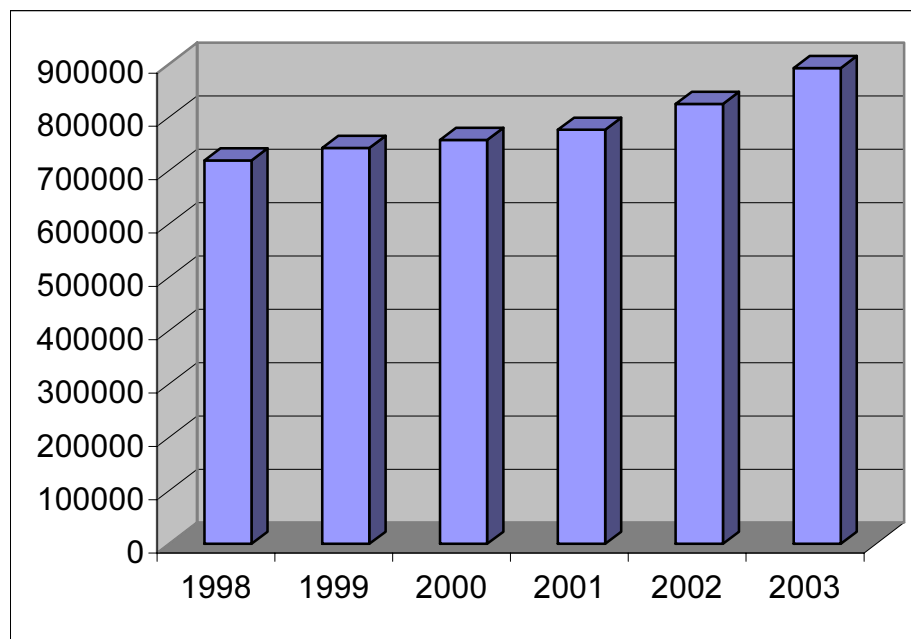
4 ZÁVĚR

Modelování a řízení robotů představuje významnou podoblast robotiky. Získání adekvátního modelu pohybu robota je nesmírně důležité pro návrh jeho systému řízení. Příliš jednoduchý model nemusí odrážet všechny významné vlivy, které ovlivňují pohyb robota. To ve svém důsledku může vést k návrhu řídicího systému, který v některých situacích nezvládne pohyb robota, což může mít velmi vážné následky. Příkladem může být neuvážení vzájemného vlivu kinematických členů při rychlých pohybech stacionárních robotů, což může vést k nežádoucím překmitům v blízkosti pevných překážek. Podobné důsledky může mít neuvážení adheze u rychlých pohybů mobilních robotů. Naopak příliš složitý model znesnadňuje návrh řídicího systému např. tím, že velmi komplikuje fyzikální pohled na celý systém a neumožňuje zakomponovat do návrhu řídicího systému fyzikální intuici. Složitě modely, které postihují i méně významné aspekty pohybového chování robota, je vhodné použít pro verifikaci již navrženého systému řízení.

K návrhu řídicích systémů robotů, konkrétně k návrhu základního zákona – algoritmu řízení pohybu robota, jsou dnes používány všechny moderní prostředky teorie řízení. Jak stacionární tak mobilní roboty jsou dnes pro specialisty v oblasti teorie řízení vděčným objektem, na kterém mohou ověřovat nejnovější teorie. Návrh zákona řízení je poměrně obtížný problém především proto, že adekvátním modelem pohybu robotů je nelineární dynamický systém. Linearizace takových systémů je tedy důležitým směrem výzkumu. V celkovém návrhu řídicího systému pak hraje roli i způsob implementace základního zákona řízení. Výpočetní složitost některých způsobů řízení může zabránit jejich nasazení v praxi.

5 PERSPEKTIVY OBORU A ROZVOJ STUDIA OBORU

Robotika je bezesporu jeden z moderních a vysoce atraktivních oborů vědy a techniky, jak z hlediska zajímavosti výzkumu tak z hlediska ekonomického. Jak již bylo v úvodu řečeno, jsou počty nasazených průmyslových robotů v ekonomicky vyspělých zemích v řádu stovek tisíců a nelze si bez nich např. představit automobilový průmysl, který je významnou složkou ekonomiky mnoha zemí. Ekonomické statistiky OSN ukazují stálý nárůst počtu použitých průmyslových robotů, viz následující graf.



Obr.6.1. Vývoj počtu používaných průmyslových robotů ve světě.

Perspektivy vývoje ve stacionární robotice jsou v řešení problémů rychlých a pružných robotických systémů, řešení problémů řízení v pracovním prostoru s pomocí vnější, např. optické, zpětné vazby. K perspektivním směrům patří také přímé plánování dráhy robota pomocí výkresové dokumentace CAD. Pro průmyslové aplikace bude zajímavý výzkum konstrukce a řízení paralelních kinematických struktur. Významným zaměřením je zvyšování manipulačních schopností robotů, např. konstrukce napodobující lidskou ruku a z toho vyplývající pomoc a pomůcky pro tělesně postižené. S tím je úzce spojen vývoj netradičních pohonů na bázi pneumatických svalů, kovů s tvarovou pamětí apod., které by měly napodobovat lidské svaly lépe než dosavadní pohony.

Na pomezí mezi stacionární a mobilní robotikou je výzkum *exoskeletonů* – zařízení, které si člověk na sebe obléká a které mnohonásobně zvýší jeho fyzické schopnosti, především sílu. Perspektivní použití exoskeletonů je např. ve zdravotnictví při manipulaci s nepohyblivými pacienty. Významným směrem bude také výzkum dálkového řízení strojů - robotů na principu *teleprezence*. Roboty řízené tímto principem mohou být významným pomocníkem hasičů a záchranářů. Podobný princip řízení je použitelný pro chirurgické roboty v oblasti tzv. minimálně invazivní chirurgie.

Významnou ekonomickou položku začínají tvořit i mobilní roboty. Jde zejména o tzv. servisní roboty určené pro pomocné práce v domácnosti, v terénu a pro volný čas. Ročenka OSN z r. 2002

udává pro tyto typy robotů počty kusů instalované v r. 2002 a předpověď počtu nově instalovaných robotů do roku 2005. V posledním řádku je cena instalovaných jednotek v USD.

TYP ROBOTŮ	2002	2002-2005
Roboty pro domácnost (Vysavače, travní sekačky apod.)	21 500	719 000
Roboty pro volný čas (hračky, hry apod.)	155 000	1 202 000
Cena v mil. USD	160	2 300

Tab.1.1. Statistika servisních robotů.

Do kategorie servisních robotů jsou započítávány také další typy robotů jako např. roboty pro práce v lesnictví a zemědělství, roboty pro pomoc policii a pyrotechnikům, roboty pro pomoc hasičům apod. Velmi perspektivní se jeví aplikace výsledků mobilní robotiky v dopravě. V blízké době se dá očekávat nástup tzv. inteligentních vozidel, ve kterých bude např. řidičovi poskytována informace o vzdálenosti a rychlosti vozidel v jeho dráze, informace o dopravní situaci, pokyny pro parkování apod. Systém bude také monitorovat bdělost řidiče. Dalším stupněm se jeví systém, který umožní automaticky řízenou jízdu v koloně a nakonec plně autonomní pohyb automobilu např. při parkování.

K tomu bude zapotřebí provádět intenzivní výzkum a vývoj v dalších oblastech s robotikou úzce souvisejících, jsou to především umělá inteligence, sensorika, řídicí technika, mechatronika, elektrotechnika, informatika a výpočetní technika.

V pedagogické oblasti je, podle mého názoru, vzhledem k interdisciplinárnosti a budoucnosti robotiky, zapotřebí zavést a rozvíjet předměty s robotickým obsahem především na vysokých školách a to na fakultách strojních, elektrotechnických a fakultách počítačových věd. Základní informace o robotice by bylo samozřejmě vhodné poskytnout studentům i na středních školách a doplnit tak vliv sci-fi literatury a sdělovacích prostředků.

Předměty, které by měly být zařazeny do studijního programu profilujícího studenta v zaměření Robotika by měly mít za cíl:

- a) V bakalářském studiu, podat studentům nezbytné informace z mechaniky, základů elektrotechniky s důrazem na elektrické pohony, programování mikroprocesorů a robotů, řízení technologických linek a základní informace o sensorice robotů.
- b) V magisterském studiu, podat studentům hlubší a rozšiřující teoreticky podložené informace z mechaniky, techniky pohonů, řídicí techniky, modelování systémů, sensoriky robotů, výpočetní techniky použité pro řízení a umělé inteligence.

V obou programech by měl být zařazen předmět, který by poskytoval celostní pohled na robotiku a doplňoval by (především v magisterském studiu) některé speciální partie, jako např. problematiku plánování dráhy robotů, tvorby map prostředí, navigace robotů, fúzi sensorických dat. Samozřejmě, že programy na jednotlivých fakultách by kladly větší důraz na tu stránku robotiky, která je bližší jejich hlavnímu směru studia.

Za důležitou pokládám v koncipování studia robotiky spolupráci výše uváděných fakult. Ta by se měla projevovat nejen v bakalářském a magisterském studiu, ale i v doktorském studiu a s ním spojeném výzkumu.

Slovo robot vzešlo z bývalého Československa. Robotika a výsledky výzkumu s ní spojené mohou přinést naší republice významný hospodářský užitek. Obojí je důvodem k maximální propagaci robotiky na naší škole.

6 VLASTNÍ PŘÍNOS ROZVOJI OBORU

Vlastní problematikou robotiky jsem se začal zabývat okolo roku 1980, kdy jsem zavedl na VUT v Brně předmět se stejným názvem. V r. 1984 jsem vydal první učební text s názvem Robotické systémy. V té době to byla jedna z prvních publikací o robotice v ČSR a jako taková získala cenu rektora VUT v Brně.

Významným impulsem k dalšímu rozvoji robotiky na FEI VUT v Brně bylo získání grantu GAČR 101/93/2435 „Moderní metody řízení průmyslových robotů“. V rámci tohoto grantu jsem na VUT v Brně vybudoval pracoviště vybavené dvěma roboty ASEA IRb6 které jsem vybavil moderním řídicím systémem, na kterém bylo možno testovat různé způsoby řízení průmyslových robotů. Řídicí systém robota byl navržen tak, aby robot bylo možno programovat a řídit přímo v pracovním, kartézském souřadnicovém systému pomocí CAD systému AutoCAD a aby robot byl schopen spolupráce s optickou zpětnou vazbou.



Obr.6.1. Experimentální pracoviště s roboty ASEA IRb6.

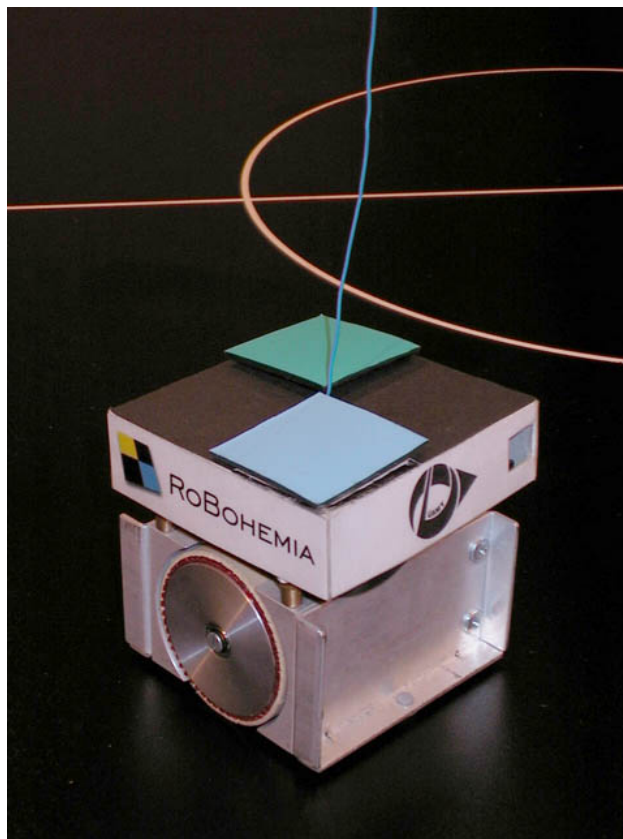
Výsledky grantu byly publikovány na mezinárodním a národním fóru [16]-[21]. Významným výsledkem byla unikátní metoda kalibrace robota, která umožnila jeho řízení v kartézském pracovním prostoru [19],[21]. Za zvlášť významný výsledek považuji návrh unikátní metody modelování a simulace stacionárních robotů, která byla vyžádána k publikaci v nakladatelství Springer [17].

V r. 2000 jsem na VUT v Brně, v rámci Výzkumného centra aplikované kybernetiky, ustavil skupinu Robotiky (později Robotiky a umělé inteligence), která zahájila výzkum v oblasti mobilní robotiky a teleprezence. Významným výsledkem mé práce v té době byl návrh mobilního, smykem řízeného robota U.T.A.R. ovládaného řídicím systémem s prvky teleprezence. Teleprezenční řízení robota dovoluje jeho použití v nestrukturovaném prostředí a poskytuje možnost kombinovat autonomní řízení s řízením, které provádí manuálně člověk. Při manuálním řízení je teleprezencí člověku předáváno maximum informace z prostředí, ve kterém se robot pohybuje. V plné míře uplatnění teleprezence má člověk dojem, že se nachází přímo v pracovním prostředí robota. Pro

autonomní řízení tohoto stroje se opět ukázala nutnost sestavení jeho modelu, který byl publikován na mezinárodním fóru [23],[31],[32]. Model smykem řízeného robota je jeden z mála modelů, který se v publikacích o mobilní robotice objevuje a byl vyžádán k časopisecké publikaci v Japonsku [22].



Obr.6.2. Robot U.T.A.R.



Obr.6.3. Fotbalový robot

Za zvlášť významný přínos považuji to, že robot druhé generace ORPHEUS, pracující na stejném principu, zvítězil ve světové soutěži záchranných robotů v RoboCup Rescue League v Padově v r. 2003.

Souběžně s výzkumem řízení robota v nestruturovaném prostředí jsem inicioval výzkum skupinového chování robotů. Za tím účelem byl postaven robotický fotbalový tým RoBohemia, na kterém je možno zkoumat a ověřovat chování skupiny robotů, která má spolupracovat za účelem dosažení určitého cíle. RoBohemia je první fotbalový tým ustavený v ČR, o jeho kvalitách svědčí fakt, že v letech 2001 a 2002 získal titul mistra Evropy. Za významný považuji svůj podíl na vývoji modelu a řízení těchto robotů. Výsledky byly opět publikovány na mezinárodním fóru [25]-[28]. Samotné získání titulů mistra Evropy vyvolalo řadu národních a mezinárodních ohlasů především v masových médiích.

7 LITERATURA

- [1] Arteaga, M.A., Yu Tang:
„Adaptive control of robots with an improved transient performance
Automatic Control“, IEEE Transactions on , Volume: 47 Issue: 7 , July 2002
pp. 1198 –1202
- [2] Astrom, K.J.; Wittenmark, B.:
“Adaptive control“, Addison-Wesley Pub Co, 1995
- [3] Bin Yao; Li Xu:
„Adaptive robust precision motion control of linear motors with negligible electrical
dynamics: theory and experiments“, Mecharonics, IEEE/ASME Transactions on , Volume: 6 Issue:
4 , Dec 2001 pp. 444 –452.
- [4] Brogliato, B.; De Wit, C.C.; Villani, L.:
„An exponentially stable adaptive control for force and position tracking of robot
manipulators“, Automatic Control, IEEE Transactions on , Volume: 44 Issue: 4 , Apr 1999 pp. 798 –
802.
- [5] Dawson, D.M.; Dixon, W.E.; Zhang, F.; de Queiroz, M.S.:
„Global adaptive output feedback tracking control of robot manipulators „, Automatic Control,
IEEE Transactions on , Volume: 45 Issue: 6 , Jun 2000 , pp. 1203 –1208.
- [6] Ferrarini, L.; Ferretti, G.; Maffezzoni, C.; Magnani, G.:
„Hybrid modeling and simulation for the design of an advanced industrial robot controller“,
IEEE Robotics & Automation Magazine , Volume: 4 Issue: 2 , Jun 1997 ,pp. 45 –51.
- [7] Gu, E.Y.L.:
„Configuration manifolds and their applications to robot dynamic modeling and control“,
Robotics and Automation, IEEE Transactions on , Volume: 16 Issue: 5 , Oct 2000 , pp. 517 –527.
- [8] Horský, J.; Novotný, J.; Štefaník, M.:
“Mechanika ve fyzice“, Academia, 2001.
- [9] Levine, W.:
“The control Handbook“, CRC Press, 1995.
- [10] Ming Liu:
„Decentralized control of robot manipulators: nonlinear and adaptive approaches“
Automatic Control, IEEE Transactions on , Volume: 44 Issue: 2 , Feb 1999, pp. 357 –363.
- [11] Natale, C.; Koepe, R.; Hirzinger, G.:
„A systematic design procedure of force controllers for industrial robots“, IEEE Trans. on
Mechatronics, Vol.5., Jun. 2000, pp. 122 –131.
Oriolo, G; De Luca A.; Venditelli, M.:
„WMR Control Via Dynamic Feedback Linearization – Design, Implementation and Experimental
Validation“, Control Systems Technology, IEEE Transactions on, Vol. 10, Nov., 2002. pp. 835-851.
- [12] Pagilla, P.R.; Yu, B.; Pau, K.L.:
“Adaptive control of time-varying mechanical systems: analysis and experiments“, IEEE
Trans. on Mechatronics, Vol.5., Dec. 2000. pp. 410 –418.
- [13] Rau, M.; Schroeder, D.:
“Model Predictive Control with Nonlinear State Space Models“,
7th International Workshop on Advanced Motion Control, 3.-5.7. Univ. of Maribor, 2002.
- [14] Rojko, A.; Jezernik, K.:
“Sliding Mode Motion Controller with Adaptive Fuzzy disturbance Estimation“, 7th International
Workshop on Advanced Motion Control, 3.-5.7. Univ. of Maribor, 2002
- [15] Sciavicco, L.; Siciliano, B.:
“Modelling and Control of Robot Manipulators“, Springer, 2002.
- [16] Šolc, F.:

- “Řízení průmyslových robotů“, ROBTEP'95, Prešov, 27.-29.9.1995
- [17] Šolc, F.:
“Matrix Model of Robot in Matlab – Simulink“, Lecture Notes in Computer science
Springer Verlag, 2000
- [18] Šolc F.:
“Simulace pohybu průmyslového robota“, XVI kolokvium, Vybrané problémy simulačních modelů 6.-
8.9.1994, Brno, MARQ Ostrava 1994.
- [19] Šolc, F.:
„ASEA IRb6 Robot Calibration“ RAAD 2000, Int. Workshop, 1.-3.6.2000, Maribor, Univ.of
Maribor, 2000.
- [20] Šolc F.:
“Dynamic Model of ASEA IRb6 Robot“, XVII Workshop Advanced Simulation of Systems, 18.-
20.4.1995, MARQ Ostrava 1995.
- [21] Šolc, F.:
“CP Řízení a kalibrace robota ASEA IRb6“, Nové trendy v strojířtve, 25.-26.9.1997, TU Prešov
- [22] Šolc, F.:
“Modeling and Simulation of a 4-Wheel Skid -Steered Mobile Robot“, Machine Intelligence and
Robotic Control, Japan ISSN 1345-2681, 2001, pp. 63-67.
- [23] Šolc, F., Žalud, L., Honzík, B.:
„Mathematical Model of a Skid -steered Mobile Robot for Control and Self-Localization“, 4th IFAC
Symposium on Intelligent Autonomous Vehicles. IAV 2001, Sapporo, Japan, 2001, pp. 284-289.
- [24] Šolc, F.:
„Bond Graphs in Education“, In Modern Methods in Control. CEEPUS SUMMER SCHOOL Split
2002. Split: University of Split, 2002, pp. 1 – 7.
- [25] Šolc, F., Honzík, B.:
“Modelling and Control of a Soccer Robot“, In 7th International Workshop on Advanced Motion
Control. 7th International Workshop on Advanced Motion Control. Maribor: University of maribor,
2002, pp. 506 - 509, ISBN 0-7803-7479-7.
- [27] Šolc, F., Honzík, B., Hrabec, J.:
„Control of a soccer robot“, In 7th Symposium on Robot Control SYROCO 03. 7th Symposium on
Robot Control SYROCO 03. Wroclav Poland: Wroclav University of Technology, 2003, pp. 379 - 384,
- [28] Šolc, F., Honzík, B.:
„Control of the Mobile Micro-robot“, In 2003 FIRA Robot Soccer World Congress. 2003 FIRA Soccer
World Congress. Vienna Austria: Vienna University of Technology, 2003, pp. 7 – 11.
- [29] Tomei, P.:
„Robust adaptive control of robots with arbitrary transient performance and disturbance
attenuation“, Automatic Control, IEEE Transactions on , Volume: 44 Issue: 3 , March 1999. pp. 654 –
658.
- [30] United Nations Economic Commission, Geneva, October 2002.
- [31] Žalud, L., Solc, F.:
Universal Autonomous and Telepresence Mobile Robot navigation and Control. 10th International
Workshop on Robotics, RAAD 2001. Vienna, Austria, 2001 pp. 123-128.
- [32] Žalud, L., Šolc, F.:
U.T.A.R. - univerzální teleprezenčně autonomní robot. AT&P Journal, ISSN 1335-2237, 2001, roč. 2001,
č.2., str. 60-61

Abstrakt: Publikace se zabývá především modelováním a řízením robotů. Diskutováno je modelování a řízení průmyslových – stacionárních robotů i mobilních robotů. V části modelování průmyslových robotů je položen důraz na maticový přístup k modelování. V části modelování mobilních robotů je zdůrazněn model zahrnující vliv adheze. V části zabývající se řízením jsou diskutovány moderní způsoby řízení použitelné v praxi.

Abstract: Publication deals with modelling and control of robots. Both industrial and mobile robots are taken into account. Matrix access to modeling is stressed in modelling of industrial robots. Models which include effect of adhesion are emphasized in modeling of mobile robots. Modern methods of control applicable in industry are discussed in part dealing with control.