

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STROJNÍ

Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky

Ing. Karel Šimeček

PhD Thesis

**Lokální dráhové řízení autonomního
lokomočního robotu**

**Local path control of autonomous
locomotion robot**

KONSTRUKČNÍ A PROCESNÍ INŽENÝRSTVÍ

Školitel : Prof. Ing. Zdeněk Ehrenberger, DrSc.
Oponenti : Prof. Ing. J. Talácko, CS.-ČVUT Praha
Doc. Ing. J. Skařupa, CSc.-VŠB Ostrava
Doc. Ing. V. Řeřucha, CSc.-VA Brno

Datum rigorózní zkoušky : 22. října 1997
Datum odevzdání práce : prosinec 1999
Datum obhajoby : 26. října 2000

© 2001 Karel Šimeček

ISBN 80-214-1856-7

Obsah

1. SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY	4
2. CÍL DISERTAČNÍ PRÁCE	5
3. ZVOLENÉ METODY ZPRACOVÁNÍ	6
3.1 KINEMATICKÝ MODEL TŘÍKOLOVÉHO ALR	6
3.2 KINEMATICKÝ MODEL ČTYŘKOLOVÉHO ALR	8
3.3 KINEMATICKÝ MODEL VŠESMĚROVÉHO ALR	10
3.4 ŘÍZENÍ ALR LJAPUNOVOU METODOU.....	14
3.5 BEZKOLIZNÍ PLÁNOVÁNÍ POHYBU ALR S VYUŽITÍM VEKTOROVĚ-VZDÁLENOSTNÍ FUNKCE ...	16
4. HLAVNÍ VÝSLEDKY PRÁCE S UVEDENÍM NOVÝCH POZNATKŮ	20
4.1 OBLAST KONSTRUKČNÍ.....	20
4.1.1 <i>Projekt MOBIL-II</i>	20
4.1.2 <i>Projekt OMR-III</i>	22
4.2 OBLAST TEORETICKÁ.....	23
4.2.1 <i>Algoritmus využívající matematického modelu ALR pro dojezd k cílovému bodu</i>	23
4.2.2 <i>Plánování dojezdu ALR do cílového bodu po nejkratší možné dráze</i>	24
4.2.3 <i>Algoritmus plánování dojezdu ALR do cíle s jeho natočením využívající Ljapunovy funkce</i> 25	
4.2.4 <i>Algoritmus navigace ALR s vektorově-vzdálenostní funkcí</i>	26
4.3 OBLAST EXPERIMENTÁLNÍ.....	26
4.3.1 <i>Zhodnocení výsledků algoritmu pro dojezd ALR k cílovému bodu</i>	26
4.3.2 <i>Zhodnocení výsledků Ljapunovy metody</i>	28
4.3.3 <i>Zhodnocení výsledků metody vektorově-vzdálenostní funkce</i>	29
4.3.4 <i>Výhody a nevýhody navrhované koncepce ALR MOBIL-II</i>	29
5. ZÁVĚR PRO PRAXI A DALŠÍ ROZVOJ VĚDY	30
6. PURPOSE OF THE THESIS.....	34
7. SELECTED METHODS OF A PROCESS	34
7.1 PROJECT MOBIL-II.....	35
7.2 PROJECT OMR-III	35
8. CONCLUSION.....	36
9. SEZNAM NEJDŮLEŽITĚJŠÍCH PUBLIKOVANÝCH PRACÍ DISERTANTA, KTERÉ MAJÍ VZTAH K ŘEŠENÉ PROBLEMATICE.....	38
10. SEZNAM LITERATURY	39
11. CURRICULUM VITAE	41
12. SUMMARY.....	42
13. ZUSAMMENFASSUNG.....	42

1. Současný stav problematiky

Současný rozvoj robotiky ve světě udávají státy jako Japonsko, USA, Francie a Německo. Vývoj robotů a výsledky robotiky se soustředí v oblasti letecké, námořní a kosmické techniky. Dalším oborem uplatňujícím poznatky z oblasti robotiky je automatizace nebezpečných technologií a zábavný průmysl zaměřující se na tvorbu robotických hraček.

Nadále je v současné době věnována pozornost vytvoření matematických modelů kinematických struktur a dynamiky robotických systémů.

Trendem vývoje je realizace inteligentního robota se schopností přizpůsobit se novému prostředí, plánu a řešené úloze. Robotický výzkum je důležitý, neboť pro volný pohyb potřebují roboty porozumět okolnímu prostředí.

Jednou z důležitých funkcí mobilních robotů je schopnost plánování dráhy pohybu z počátečního bodu do cílového bodu bez kontaktu s překážkami. Pro dvourozměrný prostor s polygonálními překážkami již byly navrženy různé algoritmy. Strategie plánování cesty závisí na znalosti prostředí kolem robota. Zde jsou již rozsáhlé zkušenosti z metod, které využívají teorii grafů či matematického programování. Jsou zde i metody, hledající cestu heuristickým způsobem za použití ultrazvukových, laserových či radarových senzorů. Existují také metody, které zjišťují polohu robota vizuálními senzory i v případě kdy má robot částečné či omezené znalosti o okolním prostředí.

Tyto aplikace jsou realizovány v prostředí typu IN-DOOR. Současný vývoj směřuje do vývoje algoritmů pro třídímní prostor a pro prostředí typu OUT-DOOR. Kolové mobilní roboty zde mají omezenou mobilitu, která nedovoluje jejich použití v nestrukturovaném prostředí. Zde musí být jejich pojezdová platforma restrukturalizována na pásovou či kráčejíci. Vývoj kráčející mechanismů značně pokročil díky novým konstrukčním materiálům. Vedoucími státy v jejich vývoji jsou opět Japonsko a USA a možné aplikace jsou směřovány do inspekčních a revizních činností v jaderném průmyslu a v podmořských pracích.

2. Cíl disertační práce

Cílem disertační práce je :

- Analýza faktorů ovlivňujících řízení mobilních robotů z hlediska prostředí, konstrukce podvozku, procesu.
- Vypracování metod dráhového řízení lokomočnosti pro 2. generaci robotů.
- Vypracování a ověření řídicích algoritmů pro realizovaný mobilní robot a implementovat navržené algoritmy na fyzikální model mobilního robotu.

Postupné úkoly disertační práce jsou:

- Navrhnout ALR pro IN-DOOR prostředí a pro částečně známá nebo neznámá prostředí, ve kterých se bude robot pohybovat s možností plnění obslužných úloh. ALR by měl plnit následující funkce:
 - mapování okolního prostředí
 - plánování svého pohybu
 - vyhýbání překážkám
- Navrhnout a sestavit paralelní řídicí systém robotu.
- Implementovat nabyté poznatky pro vývoj a aplikaci algoritmů pro lokální navigaci.
- Provést verifikaci výsledků.

Celkovým zaměřením disertační práce je vyřešení základních problémů se zaváděním teoretických poznatků na realizované lokomoční robotické systémy.

3. Zvolené metody zpracování

Zpracování je podřízeno cíli práce zejména ve formulaci algoritmu lokálního dráhového řízení. Cílem je vytvoření modelů z hlediska kinematiky a dynamiky dle typu pojezdové platformy. Ze třídy lokomočních robotických systémů je jako řízený objekt vybrán robot se třemi stupni volnosti. Jeho chování je ovlivňováno působícími vnějšími a tahovými silami a momenty. Pro lokomoční robotický systém byl zvolen princip lokálního a globálního řízení kdy jeho dráha musí procházet uzlovými body.

Formulace algoritmu lokálního dráhového řízení zahrnuje volbu výběru dráhy z určitého počtu drah, vyhýbání náhodným dynamickým překážkám, kopírování hranice rozměrově rozsáhlé překážky při jejím objíždění a stanovení algoritmu pro pohyb po zvolené dráze tvořené sledem uzlovým bodů s požadovanou přesností. Multisenzorická soustava měření je tvořena sdruženými senzory výstupních veličin bez zatížení šumem a náleží do třídy lineárních adaptivních systémů.

Matematické modelování a syntéza řízení lokomočních robotických systémů s možností aplikace dosažených výsledků na jiné robotické systémy je výchozí etapou.

Hlavní požadavky na mobilní roboty leží především v oblastech:

1. *lokomoční systém (podvozek)* - dovolující pohyb a směrové řízení.
2. *navigační systém* - řešící lokalizaci robotu v prostředí a kontrolu s mapou prostředí.
3. *plánování systém* - plnící funkce plánování a výběru dráhy, pohyb v prostředí a vyhýbání překážkám, mapování a modelování prostředí.

Ostatní požadavky na konstrukci jsou dány souhrnem dílčích požadavků jako například, jízdní stabilita, manévrovací schopnosti, překonávání překážek, senzorické vybavení, zdroje energie, typ řídicího systému.

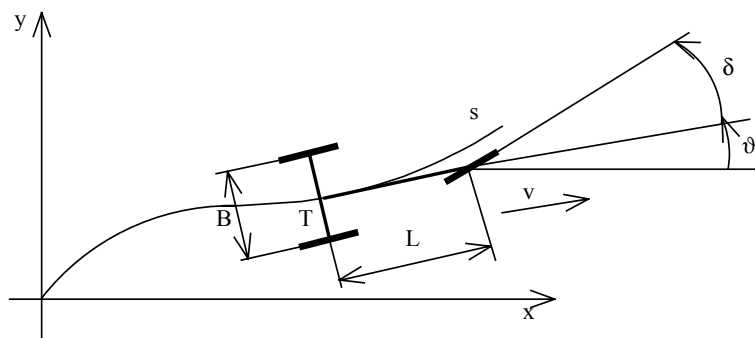
3.1 Kinematický model tříkolového ALR

Pohyb robotu se matematicky vyjadřuje převážně jako rychlost těžiště **T** robotu

$$\dot{x}(t) = \frac{dx(t)}{dt} = v(t) \cdot \cos \vartheta(t) \quad 3.1$$

$$\dot{y}(t) = \frac{dy(t)}{dt} = v(t) \cdot \sin \vartheta(t) \quad 3.2$$

jako například v Obr. 1:



Obr. 1 Tříkolový robot jedoucí po trajektorii s

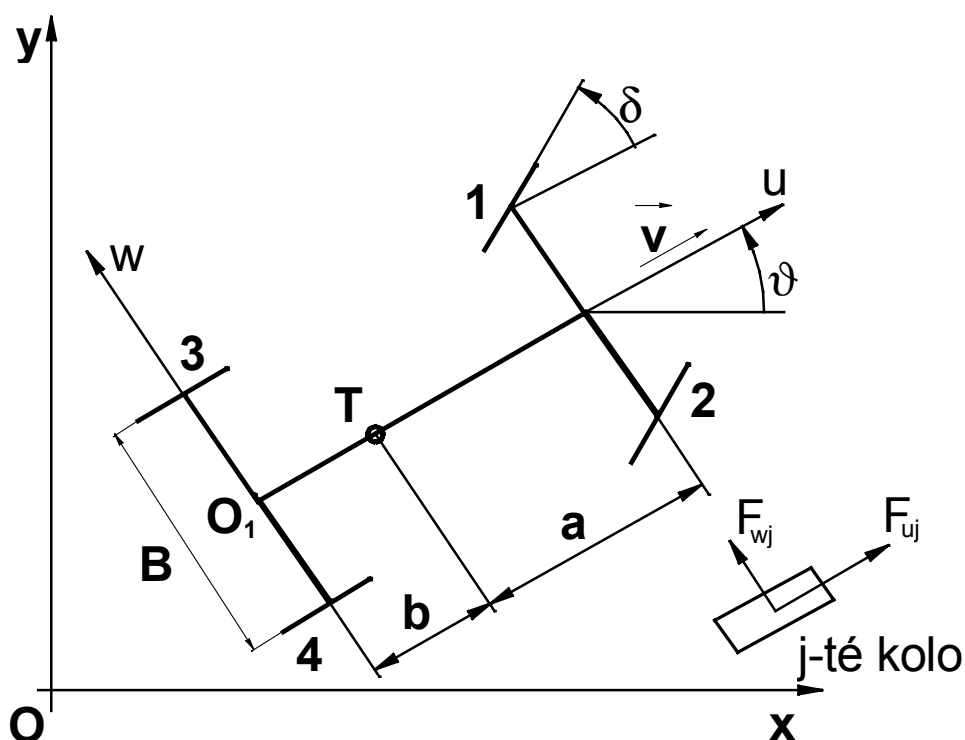
Pro sestavení algoritmu směrového řízení a navigace je důležité vyjádření vztahu mezi úhlem ϑ a δ , tj. mezi natočením robotu a natočením směrových kol.

$$\Delta\vartheta = \frac{v \cdot \Delta t}{L} \cdot \operatorname{tg} \delta(t) \quad 3.3$$

Inverzní kinematické rovnice tříkolového ALR

$$\delta(t) = \arctan \left(L \cdot \cos \vartheta(t) \cdot \frac{\dot{\vartheta}(t)}{\dot{x}(t)} \right) \quad 3.4$$

3.2 Kinematický model čtyřkolového ALR



Obr. 2 Schéma čtyř kolového podvozku lokomočního robotu

Čtyřkolový podvozek je v robotických aplikacích velice populární. Za předpokladů, že:

- a) pohyb modelu je rovinný
- b) kontakt mezi koly a povrchem je bodový
- c) robot je pevné těleso
- d) spojení vazeb je bez tření
- e) otáčení kol je bez prokluzů

jsou dynamické rovnice čtyřkolového robotu:

$$D \cdot \dot{v} + (C_1 + C_2 \cdot \dot{\delta}) \cdot v = J^T \cdot \varepsilon \Rightarrow \dot{v} = D^{-1} \cdot [-(C_1 + C_2 \cdot \dot{\delta}) \cdot v + J^T \cdot \varepsilon] \quad 3.5$$

$$\dot{q} = J_{nh} \cdot v \quad 3.6$$

kde:

$\dot{\delta} = f(path)$ rychlost natáčení kol. Je závislá na okamžitém řízení robotu.

$$\text{pro setrvačné síly: } D = J^T \cdot M \cdot J = m \cdot \left[1 + \frac{tg^2 \delta}{(a+b)^2} \cdot (b^2 + I) \right] \quad 3.7$$

$$\text{pro odstředivé síly: } C_1 = J^T \cdot M \cdot \frac{\partial J}{\partial q} \cdot J_{nh} \cdot v = 0 \quad 3.8$$

$$\text{pro Coriolisovy síly: } C_2 = J^T \cdot M \cdot \frac{\partial J}{\partial \delta} = \frac{\text{tg} \delta}{\cos^2 \delta \cdot (a+b)^2} \cdot [m \cdot b^2 + I] \quad 3.9$$

$$\mathbf{J}_h \text{ vyjadřuje Jacobiho matici } J_h = C \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & b \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad 3.10$$

$$\text{přičemž } J_{nh} = \begin{bmatrix} \cos \vartheta \\ \sin \vartheta \\ \frac{\text{tg} \delta}{a+b} \end{bmatrix} \quad 3.11$$

$$J = J_h \cdot J_{nh} = \begin{bmatrix} 1 \\ b \cdot \text{tg} \delta \\ \frac{a+b}{a+b} \\ \frac{\text{tg} \delta}{a+b} \end{bmatrix} \quad 3.12$$

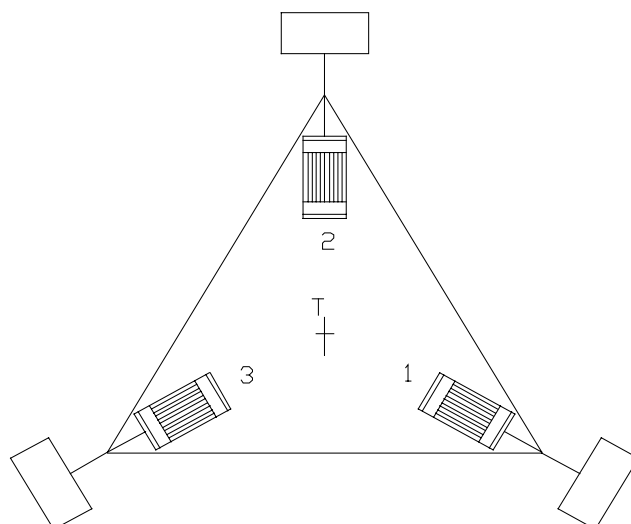
$$C = \begin{bmatrix} \cos \vartheta & -\sin \vartheta & 0 \\ \sin \vartheta & \cos \vartheta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad 3.13$$

$$M = \text{diag}(m, m, I) = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & I \end{bmatrix} \quad 3.14$$

$$\varepsilon = \begin{bmatrix} \cos \delta & \cos \delta & 1 & 1 \\ \sin \delta & \sin \delta & 0 & 0 \\ \frac{B}{2} \cos \delta + a \cdot \sin \delta & a \cdot \sin \delta - \frac{B}{2} \cos \delta & \frac{B}{2} & -\frac{B}{2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot F_u \quad 3.15$$

$$F_u = [F_{u1} \quad F_{u2} \quad F_{u3} \quad F_{u4}]^T \quad 3.16$$

3.3 Kinematický model všesměrového ALR

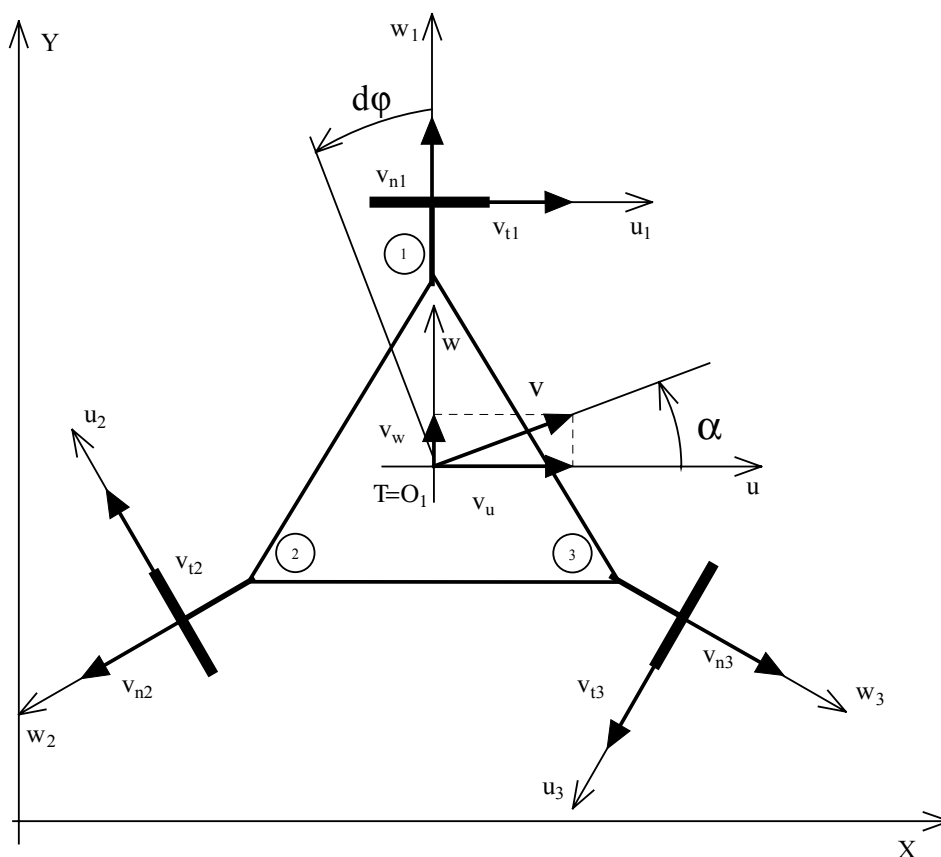


Obr. 3 Nákres půdorysu platformy všesměrového podvozku

Zpracování rovnic všesměrového modelu je realizováno s ohledem na základní mechanické systémy, které obsahují pevná tělesa a pevné i poddajné vazby. Tento typ podvozku má nezávisle poháněná všechna kola, která jsou navržena tak, že umožňují nejen otáčení kolem své osy, ale dovolují rovnoběžný pohyb s osou otáčení kola.

Předpoklady:

- a) pohyb modelu je rovinný
- b) kontakt mezi koly a povrchem je bodový
- c) robot je pevné těleso
- d) spojení vazeb je bez tření
- e) otáčení kol je bez prokluzů



Obr. 4 Schematický náčrt všesměrového robotu

$$\text{Vektor popisující polohu robotu je } \chi = [u, w, \varphi]^T \quad 3.17$$

$$\text{Vektor popisující rychlost robotu je } \dot{\chi} = [v_u, v_w, \dot{\varphi}]^T \quad 3.18$$

$$\text{Souřadnice těžiště T robotu vyjadřuje polohový vektor } q = [x, y, \vartheta]^T \quad 3.19$$

$$\text{Rychlost těžiště robotu je vyjádřena vektorem } \dot{q} = [v_x, v_y, \dot{\vartheta}]^T \quad 3.20$$

kde složky:

$$v_x = v \cdot \cos \alpha \quad 3.21$$

$$v_y = v \cdot \sin \alpha \quad 3.22$$

Sestavíme transformační rovnice z důvodu různého položení souřadných systémů v maticovém tvaru:

$$\dot{\chi} = C \cdot \dot{q} \quad 3.23$$

kde C vyjadřuje matici směrových kosinů.

$$\begin{bmatrix} v_u \\ v_w \\ \dot{\varphi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \vartheta & \sin \vartheta & 0 \\ -\sin \vartheta & \cos \vartheta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ \dot{\vartheta} \end{bmatrix} \quad 3.24$$

Obecnou rychlost v můžeme rozložit do složek v_t a v_n . Ve směru složky v_n dochází k prokluzu kol a proto s ní nepočítáme a vyjadřujeme pouze složku v_t , pro kterou platí:

$$v_{ti} = \omega_i \cdot r \quad 3.25$$

kde i je index kola $i = 1, 2, 3$ a r je poloměr kola.

Vyjádříme změnu natočení robotu od i -tého kola:

$$\dot{\varphi} = \frac{r}{3R} \cdot \omega_i \quad 3.26$$

Průmět složek rychlostí v_t u jednotlivých kol v souřadném systému u, w , můžeme vyjádřit v maticovém tvaru:

$$\dot{\chi} = A \cdot \Omega \cdot r \quad 3.27$$

$$\text{kde } A = \begin{bmatrix} \cos 0^\circ & \cos 120^\circ & \cos 240^\circ \\ \sin 0^\circ & \sin 120^\circ & \sin 240^\circ \\ \frac{1}{3 \cdot R} & \frac{1}{3 \cdot R} & \frac{1}{3 \cdot R} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{3 \cdot R} & \frac{1}{3 \cdot R} & \frac{1}{3 \cdot R} \end{bmatrix} \quad 3.28$$

$$\Omega \text{ je vektor úhlových rychlostí kol } \Omega = [\omega_1, \omega_2, \omega_3]^T \quad 3.29$$

Pak kinematický model všesměrového robotu je popsán vztahem:

$$A \cdot \Omega \cdot r = C \cdot \dot{q} \quad 3.30$$

Pro vyjádření rychlosti těžiště všesměrového robotu upravíme rovnici 3.30 na tvar:

$$\dot{q} = C^{-1} \cdot A \cdot \Omega \cdot r \quad 3.31$$

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ \dot{\vartheta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \vartheta & -\sin \vartheta & 0 \\ \sin \vartheta & \cos \vartheta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{3 \cdot R} & \frac{1}{3 \cdot R} & \frac{1}{3 \cdot R} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \end{bmatrix} \cdot r \quad 3.32$$

úpravami dostaneme rovnice:

$$v_x = \frac{r}{2} \cdot [\cos \vartheta \cdot (2 \cdot \omega_1 - \omega_2 - \omega_3) - \sqrt{3} \cdot \sin \vartheta \cdot (\omega_2 - \omega_3)] \quad 3.33$$

$$v_y = \frac{r}{2} \cdot [\sin \vartheta \cdot (2 \cdot \omega_1 - \omega_2 - \omega_3) + \sqrt{3} \cdot \cos \vartheta \cdot (\omega_2 - \omega_3)]$$

$$\dot{\vartheta} = \frac{r}{3 \cdot R} \cdot (\omega_1 + \omega_2 + \omega_3)$$

Pro vyjádření rovnic pro rychlosti jednotlivých kol všesměrového robotu upravíme rovnici 3.30 na tvar:

$$\Omega = \frac{A^{-1} \cdot C \cdot \dot{q}}{r} \quad 3.34$$

$$\begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{r} \cdot \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & 0 & R \\ -\frac{1}{3} & \frac{\sqrt{3}}{3} & R \\ -\frac{1}{3} & -\frac{\sqrt{3}}{3} & R \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \vartheta & \sin \vartheta & 0 \\ -\sin \vartheta & \cos \vartheta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ \dot{\vartheta} \end{bmatrix} \quad 3.35$$

a následnými úpravami dostaneme rovnice úhlových rychlostí otáčení kol všesměrového robotu:

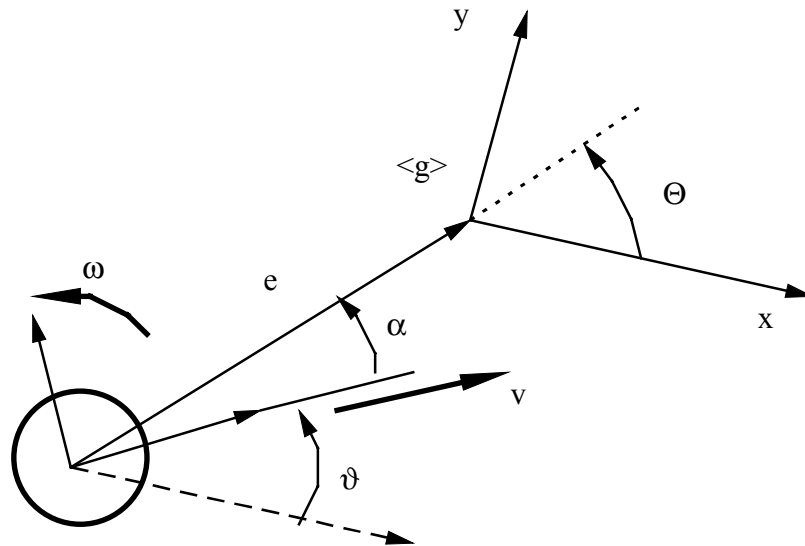
$$\omega_1 = \frac{2 \cdot (\cos \vartheta \cdot v_x + \sin \vartheta \cdot v_y) + 3 \cdot \dot{\vartheta} \cdot R}{3 \cdot r} \quad 3.36$$

$$\omega_2 = \frac{v_x \cdot (-\cos \vartheta - \sqrt{3} \cdot \sin \vartheta) + v_y \cdot (\sqrt{3} \cdot \cos \vartheta - \sin \vartheta) + 3 \cdot \dot{\vartheta} \cdot R}{3 \cdot r}$$

$$\omega_3 = \frac{v_x \cdot (-\cos \vartheta + \sqrt{3} \cdot \sin \vartheta) - v_y \cdot (\sqrt{3} \cdot \cos \vartheta + \sin \vartheta) + 3 \cdot \dot{\vartheta} \cdot R}{3 \cdot r}$$

3.4 Řízení ALR Ljapunovou metodou

Většina mobilních robotů při průzkumu prostředí nebo v reálných aplikacích řeší problém manévrů, typické pro daný typ mobilního robotu. Problému řízení těchto strojů je věnována pozornost v již existující literatuře mobilních robotů. Nedávno bylo dosaženo zajímavých výsledků s geometricky založeným přiblížením k nelineárnímu řízení a ovlivňujícím polem, tzv. neholonomním plánováním pohybu a řízení.



Obr. 5 Poloha a orientace mobilního robotu vyjádřená s ohledem na cílový bod

$$\begin{aligned} \dot{x} &= v_x = v \cdot \cos \vartheta \\ \dot{y} &= v_y = v \cdot \sin \vartheta \\ \dot{\vartheta} &= \omega \end{aligned} \tag{3.37}$$

Vyjádření polohy ALR v polárních souřadnicích popisující chybu vzdálenosti $e > 0$ a jeho orientaci Θ z pohledu cíle \mathbf{g} bude:

$$\begin{aligned} \dot{e} &= -v \cdot \cos(\Theta - \vartheta) \\ \dot{\Theta} &= v \cdot \frac{\sin \alpha}{e} \end{aligned} \tag{3.38}$$

$$\begin{aligned} \dot{\vartheta} &= \omega \\ \text{kde } \alpha &= \Theta - \vartheta \end{aligned} \tag{3.39}$$

přičemž α je úhel měřený mezi osou natočení ALR a vektorem vzdálenosti e .

$$\begin{aligned}\dot{e} &= -v \cdot \cos \alpha & 3.40 \\ \dot{\alpha} &= \dot{\Theta} - \dot{\vartheta} = v \cdot \frac{\sin \alpha}{e} - \omega \\ \dot{\Theta} &= v \cdot \frac{\sin \alpha}{e}\end{aligned}$$

Začneme výběrem struktury kandidátní Ljapunovy funkce týkající se popisovaného řídicího problému v kladné kvadratické formě, tedy

$$V = V_1 + V_2 = \frac{1}{2} \cdot \lambda \cdot e^2 + \frac{1}{2} \cdot (\alpha^2 + h \cdot \Theta^2) \quad 3.41$$

kde $\alpha, h > 0$

Pak obdržíme jejich časové derivace \dot{V} :

$$\dot{V} = \dot{V}_1 + \dot{V}_2 = \lambda \cdot e \cdot \dot{e} + (\alpha \cdot \dot{\alpha} + h \cdot \Theta \cdot \dot{\Theta}) \quad 3.42$$

$$\dot{V} = \lambda \cdot e \cdot (-v \cdot \cos \alpha) + \left(\alpha \cdot \left(-\omega + \frac{v \cdot \sin \alpha}{e} \right) + h \cdot \Theta \cdot \frac{v \cdot \sin \alpha}{e} \right)$$

$$\dot{V} = \lambda \cdot e \cdot (-v \cdot \cos \alpha) + \alpha \cdot \left[\frac{v \cdot \sin \alpha \cdot (\alpha + h \cdot \Theta)}{\alpha \cdot e} - \omega \right]$$

jehož výrazy \dot{V}_1, \dot{V}_2 vyjadřují jednu polovinu čtverce váhové normy vektoru vzdálenosti e a tzv. vektoru srovnání $[\alpha, \sqrt{h \cdot \Theta}]^T$, který je předložený robotem s ohledem na cílový bod \mathbf{g} .

Z pozdějšího vyjádření uvidíme první výraz odpovídající \dot{V}_1 . Vytvoříme funkci nezávislou na koeficientech λ, h .

$$v = (\gamma \cdot \cos \alpha) \cdot e, \text{ kde } \gamma > 0 \quad 3.43$$

pak

$$\dot{V}_1 = -\lambda \cdot \gamma \cdot \cos^2 \alpha \cdot e^2 \leq 0 \quad 3.44$$

To znamená, že první výraz \dot{V}_1 je vždy zmenšující se v čase a následkem je menší ohraničení nulou, tedy konverguje směrem ke kladnému konečnému limitu.

Dosazením 3.43 do výrazu \dot{V}_2 dostaneme:

$$\dot{V}_2 = \alpha \cdot \left[\frac{\gamma \cdot \cos \alpha \cdot e \cdot \sin \alpha \cdot (\alpha + h \cdot \Theta)}{\alpha \cdot e} - \omega \right] = \alpha \cdot \left[\frac{\gamma \cdot \cos \alpha \cdot \sin \alpha \cdot (\alpha + h \cdot \Theta)}{\alpha} - \omega \right] \quad 3.45$$

Vyjádříme úhlovou rychlost ω jednoduchou formou:

$$\omega = \frac{\gamma \cdot \cos \alpha \cdot e \cdot \sin \alpha \cdot (\alpha + h \cdot \Theta)}{\alpha} + k \cdot \alpha \quad 3.46$$

pak po dosazení 3.46 do 3.45 vznikne rovnice:

$$\dot{V}_2 = -k \cdot \alpha^2 \leq 0 \quad 3.47$$

a na závěr vyjádření časové derivace originální Ljapunovy funkce

$$\dot{V} = \dot{V}_1 + \dot{V}_2 = -\lambda \cdot (\gamma \cdot \cos^2 \alpha) \cdot e^2 - k \cdot \alpha^2 \leq 0 \quad 3.48$$

Odtud je následující Ljapunova funkce V vždy nerostoucí v čase a následně ohraničena nulou.

$$\dot{e} = -(\gamma \cdot \cos^2 \alpha) \cdot e \quad 3.49$$

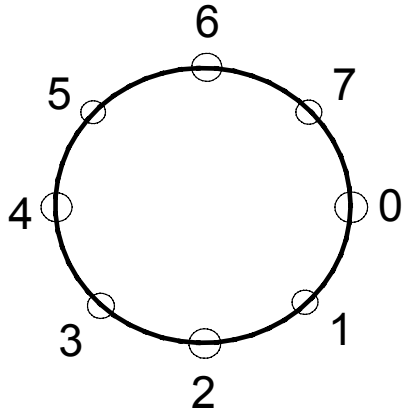
$$\dot{\alpha} = \left(-k \cdot \alpha - \gamma \cdot h \cdot \frac{\cos \alpha \cdot \sin \alpha}{\alpha} \right)$$

$$\dot{\Theta} = \gamma \cdot \cos \alpha \cdot \sin \alpha$$

Pak blíží-li se e k nule, pak i jejich derivace konvergují k nule.

3.5 Bezkolizní plánování pohybu ALR s využitím vektorově-vzdálenostní funkce

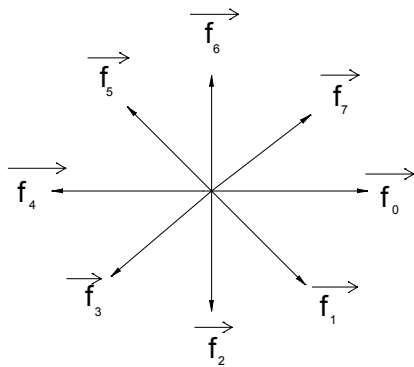
Úkolem je řešit základní problém plánování pohybu ALR v dynamickém prostředí se statickými a pohybujícími se překážkami. Jestliže je mobilní robot v neznámém prostředí, jeho řídicí systém musí být schopen obdržet a zpracovat informace z fyzického světa (prostředí) v reálném čase. To znamená, že na robota musí být namontovány pouze určitý typ sensorických systémů schopných sběru a interpretace informací.



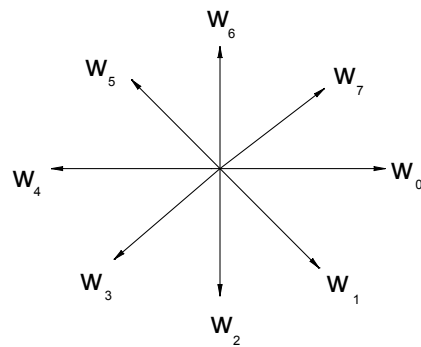
Obr. 6 Umístění senzorů na mobilním robotu

Vektorově-vzdálenostní funkce je
$$\vec{F} = \sum_{i=1}^7 \vec{f}_i \cdot w_i \tag{3.50}$$

kde $\vec{f}_i = |\vec{f}_i| \cdot e^{-j\frac{\pi}{4}i}$; pro $(i = 0,1,2,\dots,7)$ 3.51



Obr. 7 Vektory odpovídající s umístěním senzorů



Obr. 8 Váhové koeficienty příslušející senzorům

Mějme d_{sa} vyjadřující bezpečnou vzdálenost mobilního robota od překážky, d_{is} je vzdálenost překážky detekovaná i-tým senzorem.

$$|\vec{f}_i| = \begin{cases} d_{sa} \dots \dots d_{is} \geq d_{sa} \\ d_{is} \dots \dots d_{is} < d_{sa} \end{cases} \tag{3.52}$$

Váhové koeficienty w_i jsou vybrané na popsání vzdálenosti mezi i-tým senzorem a cílovým bodem. Ty senzory, které „více tíhnou“ k cílovému bodu mají „tvrdší“ váhy w_i . Předpokladem je, že nultý senzor je nejbližší k cíli **G**. Pak w_0 bude mít největší hodnotu. Pak, jestliže váhové koeficienty nalevo od w_0 a napravo od w_0 ,

jsou symetrické s ohledem na směr pohybu (tj. osy w_0, w_4) a jejich váhy jsou stejné (tj. $w_1 = w_7; w_2 = w_6; w_3 = w_5$), pak se robot nebude pohybovat, neboť plochy překážky jsou příliš rozlehlé na nalezení její hranice(boků). V tomto případě se robot musí otočit vlevo nebo vpravo a jet podél hranice překážky a tak se jí vyhnout.

Popišme **levotočivý mód**. Jednoduše vybereme váhy na levo od osy pohybu ($\overline{w_4 w_0}$), tj. zvětšíme je více než ty na pravo od osy pohybu. Pravotočivý mód provádíme obráceně.

$$w'_0 > w'_i \text{ pro } (i=1,2,3,\dots,7) \quad 3.53$$

$$w'_1 > w'_7, w'_3 \geq w'_5, w'_2 \geq w'_6 \quad 3.54$$

$$w'_i > (w'_2 \geq w'_3 \geq w'_4) \quad 3.55$$

Váhy se mění s měnící se pozicí cílového bodu **G**. Pro levotočivý mód je vektorově-vzdálenostní funkce:

$$\vec{F} = \vec{f}_0 \cdot w'_0 + \vec{f}_1 \cdot w'_7 + \vec{f}_2 \cdot w'_6 + \vec{f}_3 \cdot w'_5 + \vec{f}_4 \cdot w'_4 + \vec{f}_5 \cdot w'_3 + \vec{f}_6 \cdot w'_2 + \vec{f}_7 \cdot w'_1 \quad 3.56$$

Pro **pravotočivý mód** můžeme vektorově-vzdálenostní funkci vyjádřit:

$$\vec{F} = \vec{f}_0 \cdot w'_0 + \vec{f}_1 \cdot w'_1 + \vec{f}_2 \cdot w'_2 + \vec{f}_3 \cdot w'_3 + \vec{f}_4 \cdot w'_4 + \vec{f}_5 \cdot w'_5 + \vec{f}_6 \cdot w'_6 + \vec{f}_7 \cdot w'_7 \quad 3.57$$

Navrhovaný algoritmus se skládá ze tří samostatných módů:

1. **rotate mode** (R-mod) - volný stav - váhové koeficienty se mohou měnit
2. **lock mode** (L-mod) - pevný stav - váhové koeficienty jsou uzamčeny a tedy pevné, neměnné
3. **track mode** (T-mod) - sledovací stav

Připojením vektorově-vzdálenostní funkce s uvedenými třemi módy je ALR schopen pohybu směrem k cílovému bodu **G** a dosáhnout cílové pozice *i* v neznámém prostředí.

R-mód spočívá v nasměrování \vec{f}_0 , tj. nastavení na největší hodnotu váhového koeficientu w'_0 , směrem k cílovému bodu, a následně spočítat vektorově-vzdálenostní funkci. Výsledný směr bude vhodným směrem pro dopředný pohyb ALR.

V **L-módu** ALR uzamkne změny váhových koeficientů, bez ohledů na směr k cílovému bodu **G**. Váhové koeficienty nebudou měněny, následují změny směru pohybu. Váhové koeficienty budou beze změny, dokud senzor odpovídající největšímu váhovému koeficientu w'_0 nezdetekuje libovolnou překážku uvnitř bezpečné vzdálenosti d_{sa} . Pak je **L-mód** uvolněn.

L-mód je dobrý pro jednoduché překážky, tj. konvexní a/nebo mírně konkávní. Pro komplexní prostředí, nebo před značně konkávní překážkou, by se měl používat L-mód nebo T-mód. T-mód je použit, když máme okamžitou pozici ALR Q a vzdálenost k cíli G je $\overline{Q_j G}$. Po n krocích je pozice Q_{j+n} a vzdálenost k cíli G je $\overline{Q_{j+n} G}$.

Jestliže $\overline{Q_j G} - \overline{Q_{j+n} G} < c_1$ (kde $c_1 > 0$), **3. 58**

pak se ALR přepne na T-mód.

T-mód je použit pouze mezi okamžitým bodem H a míjejícím bodem L . Bod H je bodem na okraji překážky, kterou ALR potkává při manévru k cílovému bodu G . Po přejetí bodu H by se měl ALR pohybovat podél okraje překážky v bezpečné vzdálenosti. Bod kterým ALR opouští hranici překážky je nazýván míjející (odchodný) bod L . Bod L existuje, jestliže bod H a cílový bod G leží s bodem L na jedné přímce,

tj. $\sphericalangle HLG = 180^\circ$ **3. 59**

Pro statické překážky musí být body H a L nalezeny v páru. Pro pohybující překážky ovšem rovnice nezaručuje, že ALR dosáhne cíle G po průchodu množiny HL párových bodů. T-mód může být aplikován do částečně dynamického prostředí se statickými a pohyblivými překážkami.

Při T-módu mějme okamžitou pozici ALR Q a vzdálenost k cíli G je $\overline{Q_j G}$. Po n krocích je pozice Q_{j+n} a vzdálenost k cíli G je $\overline{Q_{j+n} G}$.

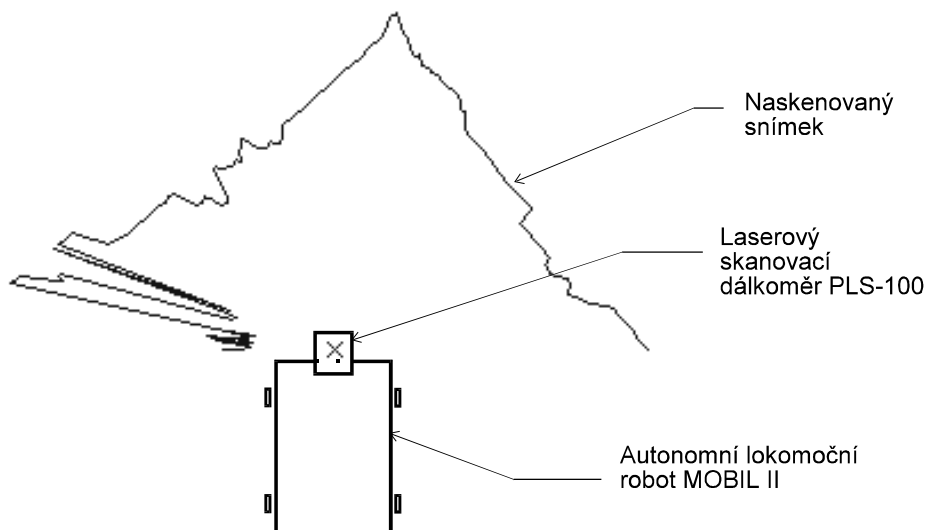
Jestliže $\overline{Q_j G} - \overline{Q_{j+n} G} < c_2$ (kde $c_2 > 0$), **3. 60**

pak T-mód není efektivní pro sledování hranice překážky a pro nalezení cesty ven. Pak je T-mód zastaven.

4. Hlavní výsledky práce s uvedením nových poznatků

4.1 Oblast konstrukční

4.1.1 Projekt MOBIL-II



Skutečné rozměry fyzikálního modelu ALR jsou:

1. Rozměry

- šířka: 680 mm
- délka: 810 mm
- výška: 400 mm
- světlost: 160 mm
- rozchod podvozku: 620 mm
- rozvor podvozku: 600 mm

2. **Hmotnost:** 40 kg (včetně řídicí soustavy)

3. **Maximální rychlost:** 0,5 m/s

4. Manévrovací schopnosti

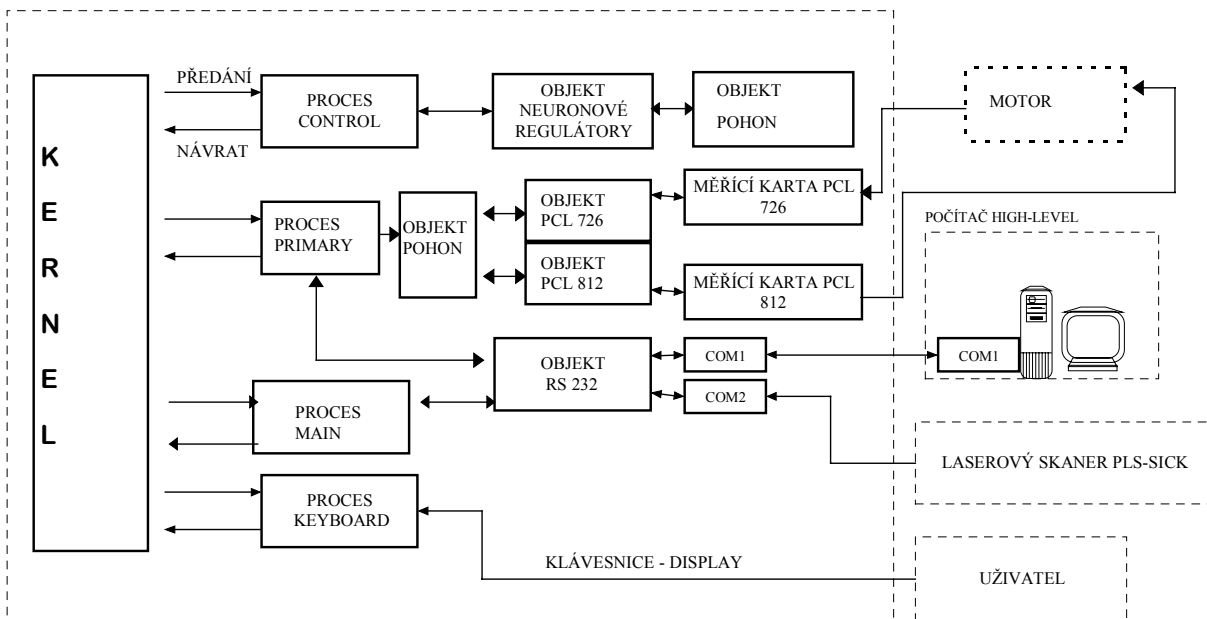
- minimální poloměr zatočení: 730 mm
- stoupavost: max 17°
- přejezd nerovností: max 10 mm
- přejezd překážky: max 20 mm

Základem konstrukce lokomočního robotu MOBIL II je kovový rám svařený z tenkostěnných ocelových profilů. Na rám jsou přimontovány nezávisle odpružené nohy čtyřkolového podvozku. Přední kola jsou natáčecí (maximální úhel natočení je $\pm 70^\circ$), zadní kola jsou poháněná.

Řídicí systém robotu byl rozdělen na dvě části. První LOW-LEVEL řídí procesy probíhající v robotu a druhá HIGH-LEVEL řídí plánování.

Struktura a funkce řídicího systému v počítači LOW-LEVEL jsou následující:

MOBIL II



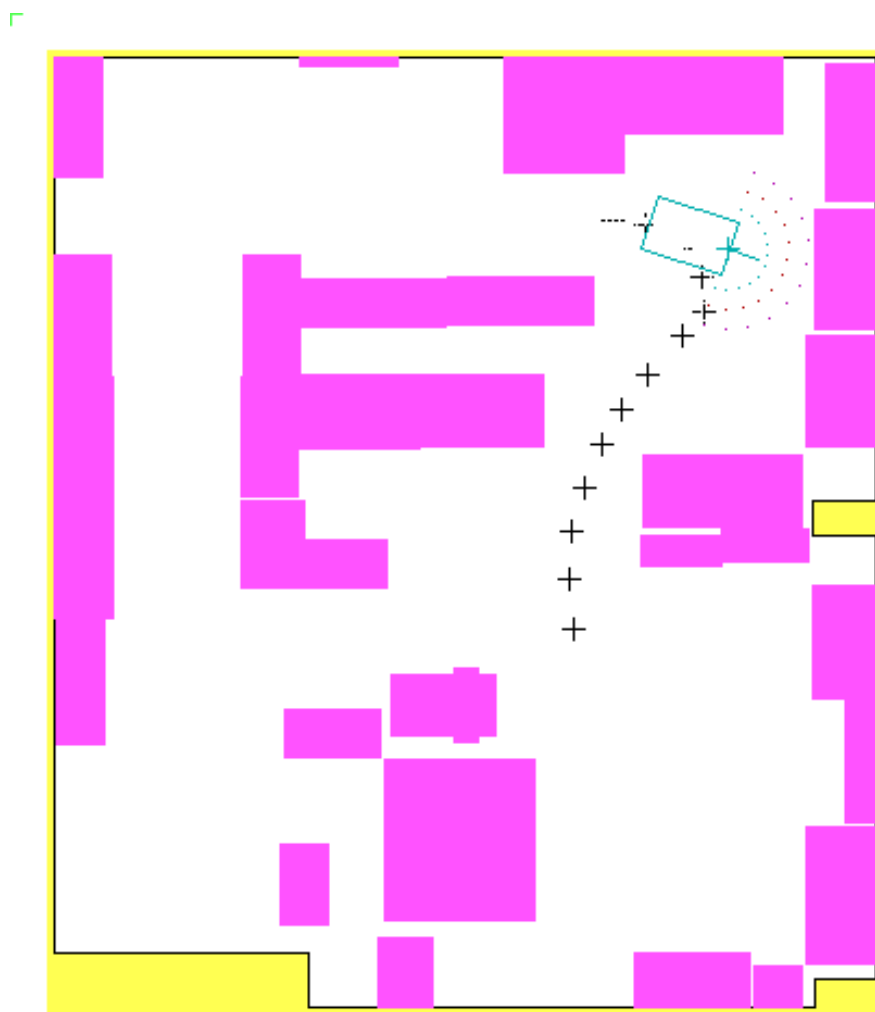
Program v počítači LOW-LEVEL má pět významných objektů:

1. **Objekt PCL 726** - pro komunikaci s měřicí kartou PCL 726
2. **Objekt PCL 812** - pro komunikaci s měřicí kartou PCL 812
3. **Objekt Neuron** - matematický model neuronové buňky
4. **Objekt Pohon** - pro ovládání motorů
5. **Objekt V24** - ovládání sériové linky

HIGH-LEVEL počítač vykonává následující činnosti :

- komunikace s LOW-LEVEL počítačem
- učení dráhy formou uzlových bodů
- jízda podél uzlových bodů

Úkolem programu HIGH-LEVEL je umožnit obsluze robotu naplánovat trasu jízdy robotu pomocí uzlových bodů. Tento úkon provede pomocí digitizéru, např. myši. Virtuální robot (Obr. 9) v počítači tuto trasu nejdříve zkontroluje simulovanou jízdou a zjistí, zda v trase nejsou pevné překážky, či zda trasa neobsahuje příliš kritické poloměry zatáčení. Komunikace s robotem je realizována sériovou linkou a vytvořeného komunikačního protokolu. Po nezbytné kontrole naplánované trasy je poslána sekvence uzlových bodů do robotu MOBIL II a je vydán povel k jízdě. Robot posílá ujetou vzdálenost, kterou HIGH-LEVEL počítač eviduje jako sled pozic robotu, na jejímž základě lze případně korigovat plán trasy jízdy.



Obr. 9 Jízda virtuálního robotu

4.1.2 Projekt OMR-III

ALR *OMR-III* [20] je společným projektem Ústavu mechaniky těles, Ústavu automatizace a informatiky a Ústavu výrobních strojů, systémů a robotiky. V projektu se jedná o stavbu tříkolového všesměrového. Základem OMR-III je rám složený z kovových profilů a třemi, po 120° , umístěnými koly. Každé kolo je poháněno 100 W motorem s převodovkou a navíc je každé kolo pružně uloženo na listové pružině. LOW-LEVEL řízení je realizováno mikroprocesorovým modulem TOS-CPU 3.0 firmy UNIS s.r.o., který zajišťuje základní pohyby podvozku.



Aby byla zajištěna všesměrovost podvozku, byla navržena a realizována speciální všesměrová kola. Součtem vektorových rychlostí jednotlivých kol bude zajištěna jízda všemi směry a otáčení se na libovolném poloměru.

OMR III komunikuje s HIGH-LEVEL obousměrným rádiovým přenosem UHF-FM firmy Radiometrix.

4.2 Oblast teoretická

4.2.1 Algoritmus využívající matematického modelu ALR pro dojezd k cílovému bodu

Máme počáteční bod $S = [x_s, y_s, \vartheta]$ a cílový bod $G = [x_G, y_G]$. Úlohou robotu je jízda z počátečního bodu **S** směrem k cílovému bodu **G** bez podmínky koncového natočení.

1. Počáteční podmínky

$$x_0 = x_s$$

$$y_0 = y_s$$

$$\vartheta_0 = \vartheta$$

2. Vzdálenost k cílovému bodu

$$Z_i = \sqrt{(x_G - x_i)^2 + (y_G - y_i)^2}$$

3. Směr k cílovému bodu

$$\Omega_i = \arctg\left(\frac{y_G - y_i}{x_G - x_i}\right)$$

4. Úhlová korekce

jestliže $(y_G - y_i) < 0$ pak $\Omega_i = \Omega_i + \pi$

5. Směr zatočení

$$\delta_i = \Omega_i - \vartheta_i$$

6. Korekce směru zatočení

jestliže $\delta_i < 0$ pak $\delta_i = \delta_i + 2 \cdot \pi$

7. Určení kam natočit kola

δ_i	AKCE
0°	ROVNĚ
$<180^\circ$	VLEVO
$>180^\circ$	VPRAVO

Tabulka 1 Tabulka úhel - akce

8. **Kinematické omezení robotu** $\delta_i \in \langle -70^\circ, 70^\circ \rangle$

9. **Změna úhlu natočení robotu** $\Delta\vartheta = \frac{v_i \cdot \text{tg} \delta_i}{(a+b)}$

10. **Natočení robotu** $\vartheta_{i+1} = \vartheta_i + \Delta\vartheta$

11. **Nové souřadnice robotu** $x_{i+1} = x_i + v_i \cdot \cos \vartheta_{i+1}$
 $y_{i+1} = y_i + v_i \cdot \sin \vartheta_{i+1}$

12. **Omezení rychlosti v přibližovacím manévru** jestliže $Z_i \geq v_i$ pak $v_{i+1} = v_i$ jinak

$$v_{i+1} = \frac{Z_i}{2}$$

13. **Kontrola zda už není robot na cílovém místě** jestliže $(Z_i - Z_{i-1}) > \varepsilon$ pak $i = i + 1$ a opakuj od bodu 2.

4.2.2 Plánování dojezdu ALR do cílového bodu po nejkratší možné dráze

Mějme konstantní přírůstek dráhy ds a budeme vybírat úhel natočení kol $\delta \in \langle -70^\circ, 70^\circ \rangle$. V prvním kroku spočítáme změnu natočení celého robotu:

$$d\vartheta_i = \frac{ds \cdot \text{tg} \delta_i}{L} \quad 4.1$$

a poté změnu souřadnic:

$$\begin{aligned} dx_i &= ds \cdot \cos d\vartheta_i \\ dy_i &= ds \cdot \sin d\vartheta_i \end{aligned} \quad 4.2$$

a dostaneme i -tý počet možných pozic robotu. Nyní musíme vybrat tu nejvhodnější. Víme-li, že souřadnice cíle \mathbf{G} jsou x_G, y_G a souřadnice robotu \mathbf{S} jsou x_S, y_S , pak vypočítáme vzdálenost od cíle:

$$Z = \sqrt{(x_G - x_S)^2 + (y_G - y_S)^2} \quad 4.3$$

a pro náš případ

$$Z_i = \sqrt{(x_G - (x_S + dx_i))^2 + (y_G - (y_S + dy_i))^2} \quad 4.4$$

Pak vybíráme takové i , pro které je Z_i nejmenší.

4.2.3 Algoritmus plánování dojezdu ALR do cíle s jeho natočením využívající Ljapunovy funkce

Máme počáteční bod $S = [x_s, y_s, \vartheta_s]$ a cílový bod $G = [x_G, y_G, \vartheta_G]$. Úlohou robotu je jízda k cílovému bodu G s podmínkou dojezdu pod patřičným koncovým natočením.

1. Počáteční podmínky

$$\begin{aligned} \gamma &\in (0,1) \\ x_0 &= x_s \quad k \in (0,1) \\ y_0 &= y_s \quad a \quad h \in (0,6) \\ \vartheta_0 &= \vartheta_s \quad \lambda \in (0,1) \end{aligned}$$

2. Vzdálenost k cílovému bodu $e = \sqrt{(x_G - x_i)^2 + (y_G - y_i)^2}$

3. Směr k cílovému bodu $\Omega = \arctg\left(\frac{y_G - y_i}{x_G - x_i}\right)$

4. Náměr na cíl: $\Theta = \Omega - \vartheta_G$

5. Úhlová odchylka mezi natočením robotu a náměrem na cíl: $\alpha = \Theta - \vartheta_i$

6. Vypočtená rychlost: $v = \gamma \cdot e \cdot \cos \alpha$

7. Změna náměru na cíl: $\Delta\Theta = \gamma \cdot \cos \alpha \cdot \sin \alpha$

8. Vypočtená úhlová rychlost: $\omega = \Delta\Theta \cdot \frac{(\alpha + h \cdot \Theta)}{\alpha} + k \cdot \alpha$

9. Změna vzdálenosti od cíle: $\Delta e = -v \cdot \cos \alpha$

10. Změna úhlové odchylky mezi natočením robotu a náměrem na

cíl: $\Delta\alpha = -k \cdot \alpha - \frac{\alpha + h \cdot \Delta\Theta}{\alpha}$

$$\vartheta_{i+1} = \vartheta_i + \omega$$

11. Nové hodnoty: $x_{i+1} = x_i + v \cdot \cos \Delta\alpha$

$$y_{i+1} = y_i + v \cdot \sin \Delta\alpha$$

$$V_1 = \Delta e \cdot \lambda \cdot e = -\lambda \cdot (\gamma \cdot \cos^2 \alpha) \cdot e^2$$

12. Výpočet Ljapunovy funkce: $V_2 = -k \cdot \alpha^2$

$$V = V_1 + V_2$$

13. Kontrola, zda už není robot na cílovém místě jestliže $e > \varepsilon$ pak $i = i + 1$ a opakuj od bodu 2.

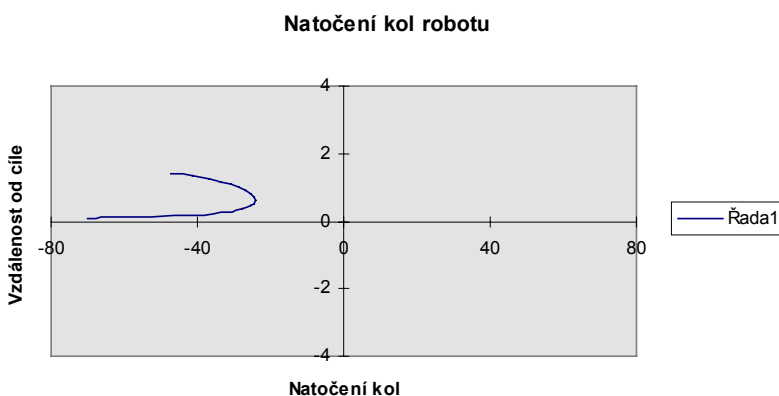
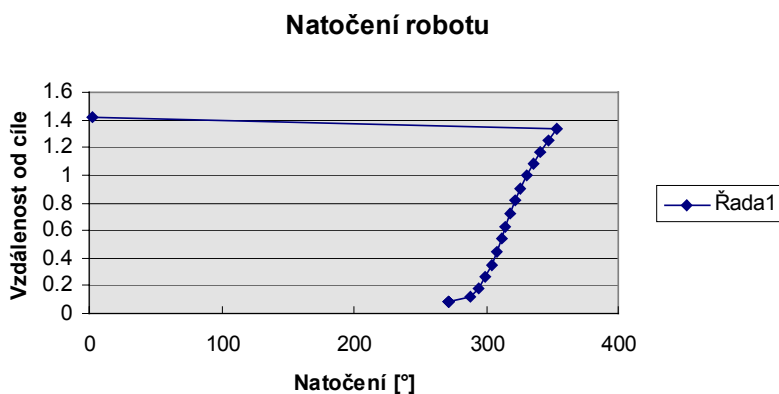
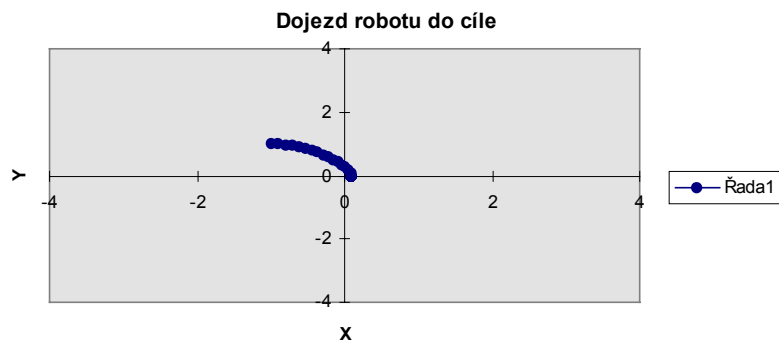
4.2.4 Algoritmus navigace ALR s vektorově-vzdálenostní funkcí

- 1) Inicializace indexu $j = 1$; okamžitá pozice ALR je v počáteční pozici **S**.
- 2) **R-mód**: Z okamžité pozice otáčí w'_0 na cíl **G** a používá rovnici **3. 50** na rozhodnutí směru pohybu. Pak se pohne směrem k cílovému bodu **G**. V každém kroku směrem k cíli je $j = j + 1$ dokud nejsou splněny tyto podmínky:
 - Cíle bylo dosaženo, pak **STOP** úlohy.
 - Jestliže $d_0 < d_{sa}$, pak jdi na **krok 3**. (d_0 je vzdálenost senzoru w'_0 od cílového bodu **G**)
- 3) **L-mód**: Zamkni váhové koeficienty a okamžitá pozice je Q_j . Vypočti rovnici **3. 50** a rozhodni kterým směrem jít. Nastav index $i = 1$. V každém kroku pohybu v L-módu jsou $i = i + 1$ a $j = j + 1$. Tento proces pokračuje dokud nejsou splněny tyto podmínky:
 - Cíle bylo dosaženo, pak **STOP** úlohy.
 - Jestliže $d_0 < d_{sa}$, pak jdi na **krok 2**.
 - Jestliže $i = n$ a rovnice **3. 58** je splněna, pak definuj okamžitou pozici ALR jako bod **H** a jdi na **krok 4**.
- 4) **T-mod**: Okamžitá pozice je Q_j a vypočte rovnici **3. 50** na rozhodnutí směru pohybu a sledování hranice překážky. Nastav $i = 1$ a každý pohyb v T-módu jsou $i = i + 1$ a $j = j + 1$. Tento proces pokračuje nejsou splněny tyto podmínky:
 - Cíle bylo dosaženo, pak **STOP** úlohy.
 - Pokud je splněna rovnice **3. 59** nebo $d_{is} > d_{sa}$, pak definuj okamžitou pozici ALR jako bod **L** a jdi na **krok 2**.
 - Jestliže $i = m$ a rovnice **3. 60** je splněna nebo se ALR vrátil do bodu **H**, pak nelze najít cestu a pak **STOP** úlohy.

4.3 Oblast experimentální

4.3.1 Zhodnocení výsledků algoritmu pro dojezd ALR k cílovému bodu

Výsledky prokazují, že lze zmiňovaný algoritmus použít, ovšem při splnění určitých podmínek. V následné tabulce lze vidět výsledek matematické simulace jízdy robotu na cíl při počátečních hodnotách $S = \left[-1, 1, \frac{3}{4}\pi \right]$ a $G = [0, 0, 0]$.



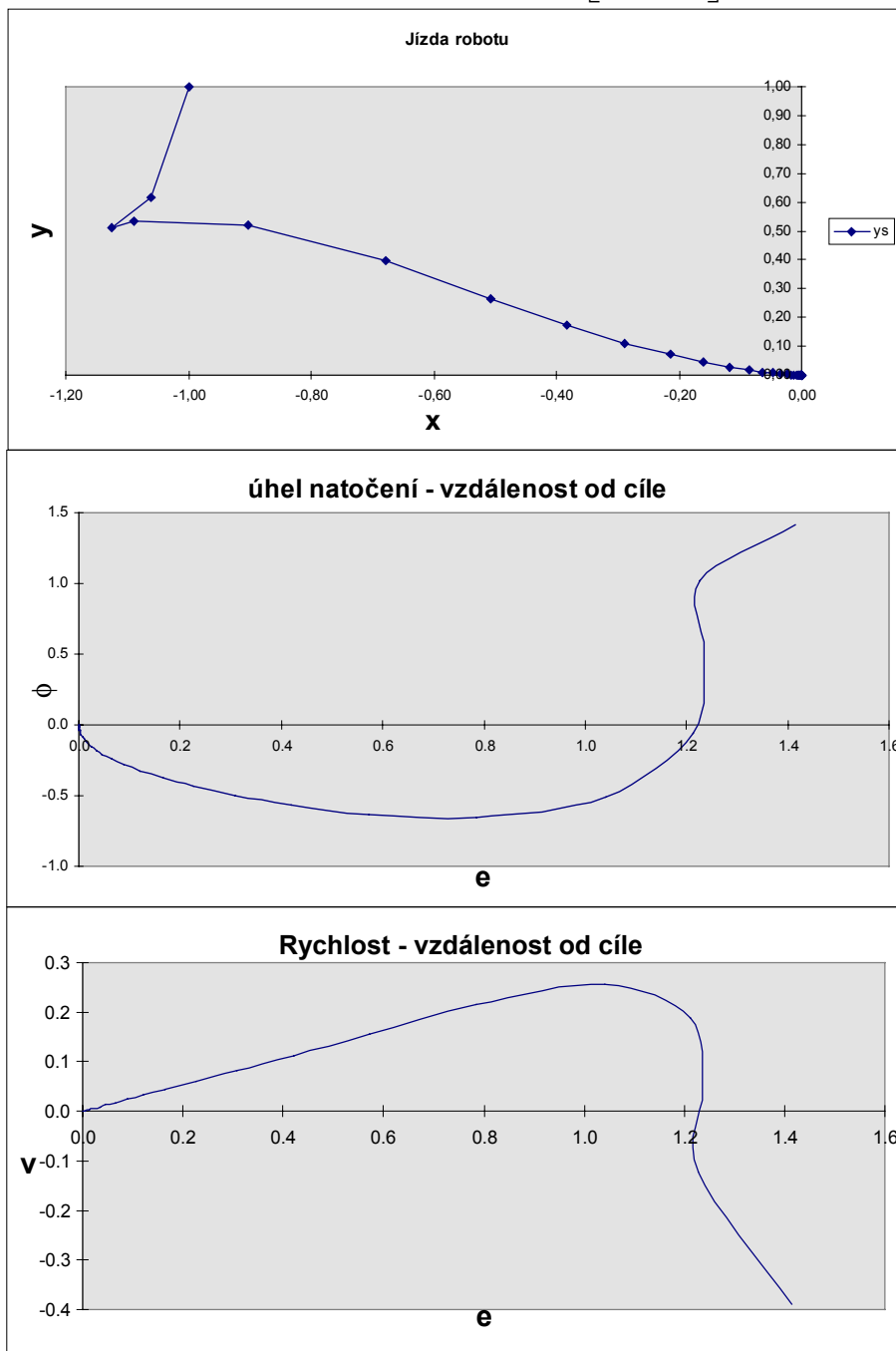
Tabulka 2 Výsledky algoritmu pro dojezd ALR do cíle

Metoda je použitelná pro jízdu dle vytčených uzlových bodů, které navádějí ALR do patřičného směru a ke konkrétnímu cíli. Tabulka 2 ukazuje, že pro ALR typu MOBIL II je velice těžké dosáhnout přesně cílového bodu **G** a to z důvodu kinematického omezení jeho robotické platformy, kdy přední kola již cílový bod **G** přesáhla, ale ne tak vztažený bod robotu. Dalším výrazně ovlivňujícím faktorem je rychlost pohybu ALR.

Algoritmus není schopen od určité vzdálenosti (pro MOBIL II cca 16cm) ALR od cíle správně reagovat na polohu uzlového bodu a řešením je dostatečná vzdálenost uzlových bodů mezi sebou. Po překročení minimální kritické vzdálenosti k uzlovému bodu je tento bod vyřazen a ŘS je předán následný uzlový bod.

4.3.2 Zhodnocení výsledků Ljapunovy metody

Výsledky matematického modelu prokazují možnost využití Ljapunovy funkce pro navigaci robotů. V následné tabulce lze vidět výsledek matematické simulace jízdy robotu na cíl při počátečních hodnotách $S = \left[-1, 1, \frac{3}{4}\pi\right]$ a $G = [0, 0, 0]$.



pro parametry: $\gamma = 0,5$; $k = 0,3$; $h = 0,5$; $\lambda = 0,55$

Tabulka 3 Výsledky Ljapunovy metody navigace.

Metoda výborně řeší problém, kdy a jaký manévr zvolit pro nájezd do uzlového bodu s patřičným natočením. Přínosem Ljapunovy metody je, že nyní se můžeme

soustředit na hledání optimálních koeficientů řešení, tj. ovlivnění rychlosti a ovlivnění úhlové korekce.

Z hlediska možných manévrů, které metoda umožňuje, bude vhodná pro tří či čtyřkolový podvozek. Praktické testování metody bych nejdříve doporučil u všesměrového podvozku OMR.

4.3.3 Zhodnocení výsledků metody vektorově-vzdálenostní funkce

Matematický model navigace s užitím vektorově-vzdálenostní funkce lze prakticky využít na ALR OMR-III. Výsledky matematických simulací ukazují, že ALR může najít bezpečnou cestu, pokud cesta existuje. Implementace algoritmu je snadná a může být realizována v reálném čase. ALR je s algoritmem schopen pohybu v neznámém prostředí a dokáže reagovat i na pohyblivé překážky. Zpětná vazba od senzorů detekující překážku a směr pohybu ALR je vyjádřen matematickými vztahy ve formě jednoduché vektorově-vzdálenostní funkce, která zajišťuje ALR maximální možnou rychlost, s ohledem na efektivní využití rozsahu použitých senzorů. Se zapnutým R-módem a L-módem si algoritmus poradí pouze s malými konvexními překážkami. Pro prostředí s dynamickými či rozměrově rozsáhlými překážkami je potřebný i T-mód.

4.3.4 Výhody a nevýhody navrhované koncepce ALR MOBIL-II

Robot MOBIL-II byl na VUT FS prvním fyzikálním modelem ALR, na kterém bylo možné provádět skutečný výzkum v oblasti řídicího systému, multi-senzoriky, lokální navigace a umělé inteligence. Z realizace projektu MOBIL-II lze provést následující závěry :

- pro **INDOOR** aplikace je mnohem výhodnější tříkolový robot typu „želva“ především z hlediska snadnějšího řízení robotu.
- Je výhodnější, mít umístěn vztažný bod robotu ve středu multi-senzorického subsystému. Vztažný bod robotu (ke kterému se počítala poloha a natočení) byl uprostřed mezi zadními koly, ale střed senzorické subsystému byl v přední části robota. Tím, že se poloha robotu a hlavně jeho natočení počítalo z inkrementální senzorů na zadních kolech, docházelo k velkým chybám při přepočtu poloh robotu do lokálních map ze senzorů.
- senzorický systém, který má úhel scanování 180° nestačí na postihnutí všech problémů v lokální navigaci. Bylo nutné mít senzory obslužen úhel minimálně 250° až 270° .
- **LOW-LEVEL** a **HIGH-LEVEL** počítače je nejvýhodnější mít přímo na robotu, odpadnou problémy se vzdálenou komunikací a zahlcením komunikačního kanálu. Spojení LOW-LEVEL a HIGH-LEVEL počítačů již nebylo možné z hlediska nosnosti a výkonu motorů robotu.
- je prokázána výhoda paralelního řídicího systému a paralelního programování, které umožňuje snadnou implementaci.

5. Závěr pro praxi a další rozvoj vědy

Předkládaná práce řeší problematiku lokálního dráhového řízení lokomočních robotů. Řešení a závěry z oblasti lokomoce a navigace ALR vycházejí především z aplikace teoretických poznatků na reálných podvozcích, které byly zkonstruovány během vědeckého bádání. Na základě výsledků shrnutých v disertační práci lze konstatovat:

1. Řešení problematiky navigace a plánování není dosud jednoznačné, neboť výběr vhodné metody komplikuje velký počet možných, omezeně použitelných metod a navíc je volba vhodné metody plánování těsně svázána s architekturou řídicího systému robotu. Řídicí systém umožňující tvorbu map okolního prostředí většinou neumožňuje její další doplnění nebo neumožňuje implementaci algoritmů s přímou odezvou a naopak.
2. Určité zjednodušení problému v metodách plánování přináší její rozdělení na globální a lokální. Rozdělení je převážně ve filozofické rovině, ve formě stanovení úloh pro globální a lokální plánování. Ovšem přesné stanovení hranice, kde končí globální a kde začíná lokální plánování je někdy v praxi obtížné. Řešením se jeví rozdělení řídicího systému do hierarchické architektury a stanovení, která jeho část má prioritu v konečném rozhodování.
3. Je-li prostředí, ve kterém se ALR pohybuje, známé, strukturované a stacionární, lze sekvenci pohybů plánovat předem (off-line). Ovšem za předpokladu, kdy řešíme pohyb ALR v komplikovaném či neznámém prostředí se statickými, popřípadě s malým počtem dynamických překážek, je nutné podřídit chování ALR okamžité situaci, v níž se nachází, tj. při plánování cesty vycházet z aktuálních informací poskytovaných vnějšími senzory (plánování on-line).
4. Z důvodu složitosti reálného okolí a jeho interakcí s ALR jsou ve většině případů znalosti o okolí ALR neúplné a nepřesné. Proto po projetí určité části trasy robotem dochází k nesouladu mezi vypočteným a skutečným stavem. Pro vyhodnocení věrohodné odchylky mezi očekávaným a skutečným stavem je potřebný multisenzorický systém integrující informaci z většího počtu různých typů senzorů.

V projektech MOBIL-II a OMR-III, ze kterých vychází disertační práce, bylo použito rozdělení řídicího systému na LOW-LEVEL a HIGH-LEVEL řízení. LOW-LEVEL obsahuje implementaci metod, souvisejících s podvozkem ALR, a je tudíž na architektuře ALR závislá. LOW-LEVEL obsahuje především metody lokomoce, sloužící k výpočtu polohy ALR, ale obsahuje také metody pro zpracování dat z vnitřních odometrů a metody pro předzpracování dat, přicházející z vnějších senzorů, které jsou posílány z LOW-LEVEL do HIGH-LEVEL. Předzpracovaná data také slouží k činnosti té části lokálního plánování, které řeší havarijní stavy ALR.

HIGH-LEVEL obsahuje algoritmy globálního plánování. Ty určují výběr vhodné trasy k dosažení cílového bodu ve stanoveném natočení. HIGH-LEVEL není závislá na architektuře ALR a obsahuje metody jako prohledávání stavového prostoru, A* metodu, Ljapunovu funkci či například metody umělé inteligence.

Pro značné množství zpracovávaných dat je požadováno, aby jak HIGH-LEVEL, tak LOW-LEVEL, byly programovány jako paralelní řídicí systém. Ještě lepších vlastností LOW-LEVEL by bylo možné dosáhnout převedením částí software řídicího systému do hardwarové implementace ve formě jednočipových mikroprocesorů.

V práci jsou uvedeny metody plánování, použité v projektu ALR MOBIL-II a metody, které byly testovány počítačovou simulací. Za předpokladu, že řešíme pohyb ALR v komplikovaném či neznámém prostředí se statickými, popřípadě s malým počtem dynamických překážek, byli všechny metody plánování vybírány s ohledem na schopnost:

- vyhýbání se překážkám
- bezcílného pohybu v daném prostředí
- vytváření modelu prostředí

V průběhu experimentů bylo pracováno s více druhy senzorů. Z teoretických i praktických výsledků se potvrdilo, že základem sensorické soustavy lokomočního robotu by měl být senzor typu PLS nebo senzor s podobnou přesností, rychlostí a množstvím pořízených dat.

Disertační práce se dále zabývá stanovením matematického modelu lokomoce pro konkrétní pojezdovou platformu ALR na základě určujících faktorů prostředí, činnosti a řešené úlohy. Byli formulovány modely lokomoce pro tříkolový, čtyřkolový a všesměrový podvozek ALR. Vzhledem k šířce problematiky, kterou matematické modely lokomoce tvoří, se práce jimi zabývá pouze do úrovně pohybových rovnic. Bylo by potřebné se dále zaměřit na detailní popis modelů, kompenzující různé chyby odometrie nebo prokluzu kol, např. při zatáčení, při velkých zrychleních nebo zpomaleních jízdy robotu.

Předložená práce je dílčím výsledkem akademického aplikovaného výzkumu. Za přínos práce v oblasti lokomoce a navigace ALR lze považovat :

1. Analýzu ovlivňujících faktorů řízení ALR - shrnutí a utřídění podmínek kladených na ALR.
2. Analýzu a formulaci matematických modelů lokomoce z hlediska kinematiky a dynamiky používaných ALR.
3. Analýzu používaných metod pro navigaci ALR
4. Formulaci metody globální navigace pomocí Ljapunovy funkce a následné ověření počítačovou simulací.
5. Formulaci metody lokální navigace pomocí vektorově-vzdálenostní funkce a následné ověření počítačovou simulací.

Disertační práce přináší řadu prakticky využitelných výsledků pro konstrukci mobilních robotů i v podmínkách české ekonomiky, kde již některé podniky začínají řešit automatizaci nebezpečných technologií především s ohledem na ISO 9000. Vyloučení lidského faktoru lze provést užitím značného rozsahu automatizace a člověk následně v procesu výroby přebírá úlohu kontrolní. Automatizace dále bývá nasazována s ohledem na bezpečnost práce, (z důvodu vysokých finančních penále za ublížení na zdraví v souvislosti s vykonávanou prací).

Kromě toho disertační práce poskytuje východiska pro další rozvoj výzkumu a vývoje mobilních robotů v následujících oblastech a směrech:

1. Globální plánování Ljapunovou funkcí. I když je metoda závislá na použitých koeficientech, přesto výborně řeší problém, kdy a jaký manévr zvolit pro nájezd do uzlového bodu s patřičným natočením. Přínosem Ljapunovy metody je, že nyní se můžeme v plánování soustředit na hledání optimálních koeficientů řešení, tj. ovlivnění rychlosti, ovlivnění úhlové korekce. Její snadná implementace do řídicího systému a schopnost vygenerovat vysoké množství různých cest v krátkém čase ji určuje k možné spolupráci s jinými metodami umělé inteligence. S ohledem na možné generované manévry, které Ljapunova metoda umožňuje, bude její nevhodnější využití u všesměrového podvozku OMR-III.
2. Lokální plánování vektorově-vzdálenostní funkcí. Výsledky počítačových simulací ukazují, že ALR může najít bezpečnou cestu, pokud cesta existuje. Implementace algoritmu je snadná a může být realizována v reálném čase i na úrovni řídicího systému LOW-LEVEL. I když metoda není koncipovaná pro nasazení v globální navigaci, přesto je s ní ALR schopen pohybu i v neznámém prostředí a dokáže reagovat na pohyblivé překážky. Zpětná vazba od senzorů detekujících překážky, popsána matematickými vztahy, kdy směr pohybu ALR je vyjádřen jednoduchou vektorově-vzdálenostní funkcí, zajistí mobilnímu robotu maximální možnou rychlost s ohledem na efektivní využití rozsahu použitých senzorů. Matematický model plánování s užitím vektorově-vzdálenostní funkce lze prakticky nejlépe využít na ALR OMR-III nebo při tvorbě map neznámého okolního prostředí, kdy globální plánování nelze použít.
3. Z realizace podvozků ALR v projektech MOBIL-I, MOBIL-II a OMR-III byli získány cenné zkušenosti s jejich konstrukcí, ověřeny kladné a záporné vlastnosti podvozků, řídicího systému, zdrojů energie aj. Také bylo realizováno několik typů multisenzorických prvků a eliminována řada teoretických přístupů, které se v praxi neosvědčily. Jako příklad slouží ústup od ultrazvukových senzorů a stále častěji se používá laserových a radarových senzorů.

4. Mechatronického řízení adheze při jízdě ALR. Praktické výsledky jízd ALR MOBIL-II a OMR-III ukazují na vhodnost výzkumu v oblasti mechatronického řízení. tj. problematika aktivního pérování. Optimální řešení tohoto problému zajistí větší přesnost vnitřních odometrů především při zatáčení a při přejíždění nerovností a v důsledku toho i větší nároky na systém lokální navigace a strukturu multisenzorického systému.

Věřím, že poznatky dosažené v této práci budou využity v dalším vývoji konstrukce a řízení lokomočních robotů u nás.

6. Purpose of the thesis

Analyses influence a factors of control a mobile robots from view enviroment, contruction undercarriage and process.

- Elaboration of method path control locomotion for 2. Generation robots
- Elaboration and verification of control algorithms for realized locomotion robot and implementation of a design on physical model of locomotion robot.

The thesis have sight on resolving general problems with a loading academic experiencies on new type locomotion robotic systems.

7. Selected methods of a process

Formulation algorithm of a local path control locomotion robot have had a selection path from certain number of paths and keepeing away from dynamic obstacles too. The algorithm must allow motion by choosing path created from set nodal points with desired precision.

The cardinal requests on autonomous locomotion robots are in this domains:

- Locomotion system - undercarriage allowing motion and directional control
- Navigation system - solving localization of robot in enviroment and verification current enviroment with robot enviromental map.
- Planning system - planning and selecting path, a motion in enviroment, a keeping away from obstacle, a creating enviromental map.

Other requirements on contruction of autonomous locomotion robot are given summary fractional requirements such as a motion stability, a manoeuvering ability, an ability overcome obstacles, a senzor accesories, a power supply etc.

The thesis solving problematic local path control of autonomous locomotion robots. Solution and deduction from domain of locomotion and navigation robots are from application theoretical knowledges on real undercarriages, that was created during of the science work. From elementary results summaries in this thesis we can tell:

- Solution navigation and planning isn't still definite, because choosing applicable method involving search of the big number possible paths.
- Small simplification of problem in planning method bringing divide on local and global planning, but it is very difficulty. Solution is perhaps in divide of control system to hierarchy structure.
- We can planning sequencing motions only, when robot know enviroment. This enviroment should have structural and stationary. Solving motion of locomotion robot in complicated or unknow enviroment with static or with small number dynamic obstacles is difficulty, because robot must issue from actual position in enviroment and change own control. Robot get actual position from external sensors.

- In the most case is real enviroment heavily complicated and robot have not exactly knowledges about enviroment. When robot override some path, it can get disharmony between calculated and current position. For evaluation authentic deviation between expected and actual robot's condition is necessary multisensor system integration of informations from greater number different type of sensors.

7.1 Project MOBIL-II

The robot MOBIL-II is the experimental platform of four-wheeles autonomous locomotion robot, that is used for laboratory experimental works, regarding a planning, a navigation, a global and a local mapping. It is used on contruction of low-level multi-sensory system. Robot has solved a sensor data fusion, the local map creation for navigation tasks, such as a driving ALR in corridors and narrow passages, an avoiding obstacles, an its space location without external beacons or marks. (see fig. 1)

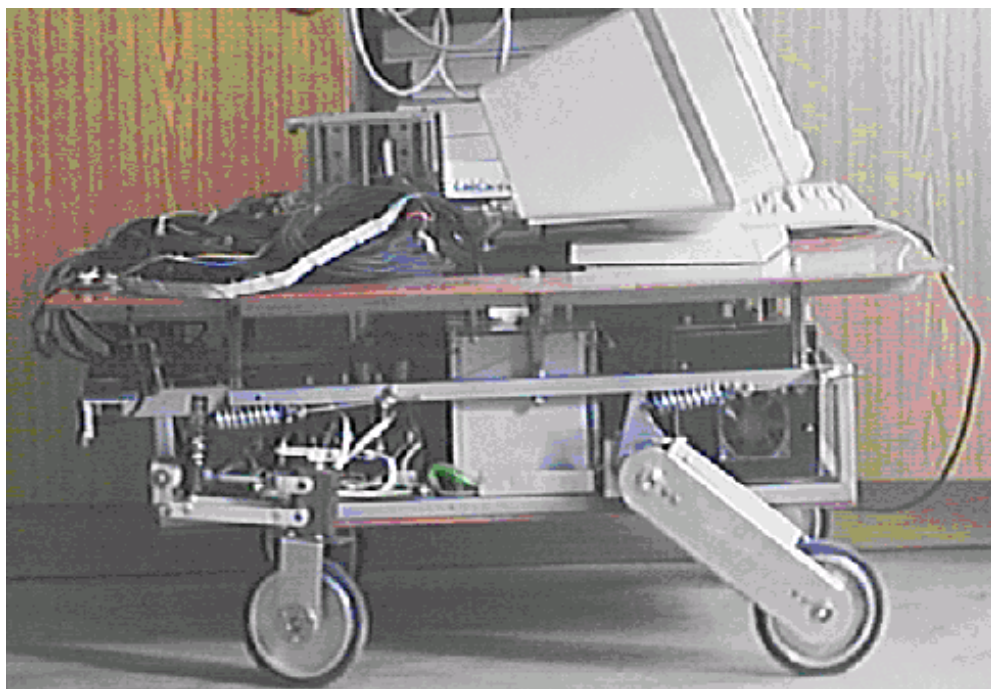


fig. 1 Four-wheeled autonomous locomotion robot MOBIL-II

7.2 Project OMR-III

This robot is the first from the row on the BUT BRNO, the FME produced, which is designed on the omnidirectional undercarriage with three wheels, placed over a base circumference over 120° . At it is seen from picture, so designed robot under common conditions could not move. That is why the special omnidirectional wheels (see **Chyba! Neznámý argument přepínače.**) were used, which indeed unable movement perpendicular to axis of rotation, and simultaneously even movement

parallel to axis of rotation. From mentioned it is clear, that so designed robot can change in any moment the ride direction, without having to turn or manipulate in complex way. So designed robot is extraordinary suitable for so called INDOOR applications, where navigations can be a very complex.



fig. 2 special omnidirectional wheel



fig. 3 Omnidirectional undercarriage with three wheels

8. Conclusion

In a projects MOBIL-II and OMR-III was used divide of control system on LOW-LEVEL and HIGH-LEVEL control. The LOW-LEVEL contains implementation of method connected with undercarriage and it is depended on architecture of locomotion robot. The LOW-LEVEL contains methods of movement, that calculating position of robot and contains methods on processing of information from inner sensors.

The HIGH-LEVEL contains algorithms of global planning. This choose appropriate path at acquirement of target point. The HIGH-LEVEL is not depended on architecture of locomotion robot. The HIGH-LEVEL contains methods such as search workspace, A* method, Lyapunov function or methods of artificial intelligence.

In theses are describe the planning method used in the project MOBIL-II and methods, that was tested computer simulation. All methods was chosen with respect on ability:

- keeping away from obstacles
- aimless motion in a particular know enviroment
- creating of enviromental map

During experiments were manipulated with a several type of sensors.

The thesis describe determination of mathematic model of locomotion for selected undercarriage on base a consideration factors enviroment, a process and a task to be solution. The models were formulated for three-wheels, four-wheels and omnidirectional undercarriage. The thesis are fractional result academical and applied research. Acquisition thesis in domain locomotion and planning robots are:

- Analyses of factors affecting the control locomotion robot - recapitulation and sorting of terms from undercarriage properties.
- Analyses and formulation of mathematic models locomotion from the view kinematic and dynamic properties used a robot
- Analyses used planning methods
- Formulation of global planning method by Lyapunov function and verification computer simulation.
- Formulation of local planning method by vector-distance function and verification computer simulation.

I want believe, that result attained in thesis, will exploit in next development of contruction and control of locomotion robots.

9. Seznam nejdůležitějších publikovaných prací disertanta, které mají vztah k řešené problematice

- [1] - *Král R., Šimeček K., Opluštil V., Svačina D., Gonda P.*: **Inteligentní autonomní mobilní robot MOBIL-II**. Proc. National Conference With International Participation, Engineering Mechanics '95, vol.1,pp. 285-290, Svratka, Czech Republic, 1995.
- [2] - *Král R., Šimeček K., Opluštil V., Svačina D., Gonda P.*: **Experimentální mobilní roboty**, Robtep 95, pp. 217-220, Prešov, Slovensko, 1995
- [3] - *Šimeček K.*: **Soustava s výrazným zastoupením mechatronických prvků**. Konference Inženýrská mechanika '96, s. 277-282, Svratka, 1996
- [4] - *Opluštil V., Svačina D., Gonda P., Král R., Šimeček K.*: **Experimentální autonomní mobilní robot : MOBIL-II**, Mezinárodní kongres MATAR, sborník přednášek sekce 3, s. 142 - 148, Praha, Česká republika, 1996.
- [5] - *Opluštil V., Gonda P., Král R., Svačina D., Šimeček K.*: **Mobil II - Experimental Autonomous Mobile Robot**, Proceedings of The NordDesign'96, pp. 201-208, Espoo, Finland, 1996.
- [6] - *Šimeček K.*: **Postup při návrhu matematického modelu autonomního lokomočního robotu MOBIL-II**, Aplikovaná mechanika 1999, str. 197-204, Brno, 1999.

10. Seznam literatury

1. *Doc.Ing. Ondráček Emanuel, Csc. - Doc.Ing. Janíček Přemysl, Csc.:* **Výpočtové modely v technické praxi**, Praha, SNTL 1990.
2. *Prof. Janíček Přemysl :* **Přednášky TECHNICKÝ EXPERIMENT**, VUT FS, Brno.
3. *Ludvík Souček :* **Tušení stínu**, Československý spisovatel Praha, Naše Vojsko 1979.
4. *Borenstein J. - Feng L. :* **A Benchmark Test for Measuring Odometry Errors in Mobile Robots**, Proceeding of the SPIE Conf. On Mobile Robots, p. 12, Philadelphia 1995.
5. *Hájek V. :* **Experimentální metoda a ověřování napjatostí konstrukcí**, Praha, ČVUT 1980.
6. *Beňa J. - Kossaczky E. :* **Základy teorie modelování**. Bratislava, Veda 1981.
7. *Prof.Ing. Ehrenberger Zdeněk, DrSc. - Doc.Ing. Kolíbal Zdeněk, CSc.:* **Průmyslové roboty III - Robotické systémy vyšších generací**, Brno, VUT FS, Brno 1993.
8. *Ing.Martin Vítů:* **Analýza chyb vnitřní navigace autonomních lokomočních robotů**, [Diplomová práce], VUT FS, Brno 1997.
9. *Ing. Radek Knoflíček:* **Metodika návrhu mechanické části mobilních robotických systémů**, [Disertační práce], VUT FS, Brno 1996
10. *Havel M.I. :* **Robotika. Úvod do teorie kognitivních robotů**, SNTL, Praha 1980.
11. *RNDr. Vladimír Opluštil:* **Analýza multi-senzorických subsoustav pro autonomní mobilní roboty**. [Teze disertační práce k rigorózní zkoušce], VUT FS, Brno 1997.
12. *Šimeček Karel:* **Problematika lokomočních robotů**, [Diplomová práce], VUT FS, Brno 1994.
13. *Kolektiv:* **Aplikovaná matematika I, II**, SNTL, Praha 1978.
14. *Ing. Radek Král:* **Analýza současného stavu v oblasti neuronových sítí a jejich využití v mobilních robotech**, [Disertační práce], VUT FS, Brno 1998.
15. *Michele Aicardi, Giuseppe Casalino, Antonio Bicchi, Aldo Balestrino:* **Closed Loop Steering of Unicycle-like Vehicles via Lyapunov Techniques**, IEEE Robotics & Automation Magazine, pp. 27-35, March 1995.
16. *Chia-Pin Wu, Tsu-Tian Lee, Chau-Ren Tsai:* **Obstacle avoidance motion planning for mobile robots in a dynamic environment with moving obstacles**, ROBOTICA 1997, Volume 15, pp. 493-510.
17. *V.J.Lumelsky, A.A. Stepanov:* **Dynamic Path Planning for a Mobile Robot Automation with Limited Information**, IEEE Trans. On Automatic Control 31, No. 11, pp. 1058-1063, 1986.

18. *D.P. Miller: Planning and Problem Solving*, In: *Tutorials on Autonomous Mobile Robots*, 1989 Int. Conf. on Robotics and Automation, Scottsdale, Arizona, pp. 1-12, May 14-19 1989.
19. *H.P. Huang, P.C. Lee: Real-time Algorithm for Obstacle Avoidance of Autonomous Mobile Robots*, *Robotica* 10, Part 3, pp. 217-227, 1992.
20. *Singule Vladislav: Structure of electrical, sensor, control and navigation systems of autonomous omnidirectional mobile robot*, *Mechatronics and Robotics* 99, pp. 149-154, Brno 1999.
21. *Ošmera Pavel: Used sample NO. CZ7671 U1, The Vehicle with three omnidirectional wheels*, 1998.
22. *P. Bolzern, R. DeSantis, A. Locatelli, S. Togno: Dynamic model of two-trailer articulated vehicle subject to non-holonomic constraints*, *Robotica* 1996, pp. 445-450, Cambridge university press, 1996.
23. *Steinwender Dieter, Frieel Frederick A.: Šachy na PC*, UNIS Edition, Brno 1997.

11. Curriculum Vitae

Ing. Šimeček Karel, narozen 18.9.1969, absolvoval v roce 1994 VUT BRNO fakultu strojní, obor Stroje a zařízení pro strojírenskou výrobu, specializace Počítačové navrhování strojních soustav. V letech 1994 až 1997 se věnoval postgraduálnímu studiu, obor Konstrukční a procesní inženýrství, na Ústavu výrobních strojů, systémů a robotiky, kde se zabýval vývojem mobilních robotů. Od roku 1998 pracuje jako systémový inženýr informačních technologií a programátor trenažérových systémů v ČEZ a.s., JE Dukovany.

12. Summary

The thesis deals with the problem of local path control of autonomous locomotion robots. Concerning the way the undercarriage of a robot is created, robots can be divided to biological and artificial systems. The thesis is focused on detailed division of artificial systems, as well as on description of their features. It also analyses the main factors affecting the control of locomotion robots, concerning environment, activities and tasks to be solved.

The next part of thesis is focused on the ALR mathematical models of locomotion. Considering the three-wheels-robots, four-wheels-robots and omni-directional robots, the equations of locomotion in general form are introduced and described. The thesis also deals with implementation of the MOBIL-II and OMR-III projects. The problems of selection and valuation of particular methods of global and local navigation of the undercarriage is analysed.

13. Zusammenfassung

Die Dissertationsarbeit befasst sich mit der lokalen Fahrbahnsteuerung von autonomen Lokomotionsroboten. Die Lokomotionsroboten aus Sichtpunkt der Fahrwerkkonzeption lassen sich in der zwei Hauptgruppen unterteilen und zwar in der biologischen und der künstlichen Systemen. Die Arbeit hat das Ziel gesetzt, ausführliche Verteilung und Beschreibung von Eigenschaften der künstlichen robotischen systemen durchzuführen. Es werden aus den Sichtpunkt der Funktion, Umgebung und der gelöste Aufgabe alle Einflussfaktoren der Steuerung der Lokomotionsroboten analysiert.

Anschließend wurden Gliederung und Beschreibung der mathematischen Modellen ALR mit der Bewegungsgleichungen in allgemeinen Form für Lokomotionsroboten mit verschiedenen Fahrwerken bearbeitet einschließlich drei- und vierräderfahrwerken sowie multidirektionale Fahrwerken.

Ein Teil der Disertationsarbeit wurde an der Analyse von Navigationsgebiet, an Auswahl und Bewertung der konkreten Methoden für globalen und lokalen Navigation bei der Fahrwerkkonzeption in realisierten Projekten MOBIL-II und OMR-III gewidmet.