

ROBOTIKA

Autoři textu:

Doc. Ing. František Šolc, CSc.

Ing. Luděk Žalud, Ph.D.

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.

Robotika je moderní multidisciplinární obor zahrnující znalosti mechaniky, elektrotechniky, teorie řízení, měřicí techniky, umělé inteligence a celé řady dalších disciplín. I když robotika pokrývá poměrně speciální oblast techniky svědčí o její rozšířenosti resp. zájmu o ní počet odkazů, které jsme našli v době psaní tohoto textu na [www](http://www.google.com/) vyhledávači „google“ (<http://www.google.com/>) na klíčová slova „robotics“ (1 340 000), „robot“ (2 960 000), „automation“ (3 850 000). Domníváme se, že základní znalosti z oblasti robotiky, patří do výbavy absolventa vysoké školy z oblasti automatizace. Následující text je psán s tímto cílem a zaměřuje se především na tu oblast robotiky, která našla masovější použití v praxi, zároveň bychom však chtěli čtenáře seznámit s možnými perspektivami tohoto technicky atraktivního oboru jehož konečným cílem je zřejmě , jak je patrné z následující exkurze do historie, vytvoření univerzálního robota, který by dokázal téměř to co člověk.

Od roku 1990, kdy byl na Fakultě elektrotechnické VUT v Brně vydán zatím poslední učební text [Šolc, 1990] týkající se robotiky, prodělala robotika značný vývoj.

2 Z HISTORIE ROBOTIKY

Po celá staletí byla většina lidstva odsouzena k celoživotní tvrdé a vyčerpávající fyzické práci. Nejlépe si to patrně uvědomíme, když se podíváme do některého z muzeí průmyslové revoluce (19. století), případně do skanzenu. Po celodenní dřině mohla být člověku útechou fantazie ve které se dostával do světa bytostí a strojů, které pracovaly za něj samy - automaticky. Byl to svět létajících koberců, džinů, golemů a jiných bytostí. S rozvojem společnosti se začaly tyto sny uskutečňovat. Většinou snaha o automatické vykonávání práce vedla ke konstrukci automatických zařízení naprosto nepodobných člověku, nicméně snaha vyrobit umělého člověka – robota provází a zřejmě bude provázet člověka ještě dlouhou dobu. Tak jak se vyvíjela technika měly první napodobeniny člověka, případně zvířete podobu mechanickou. Známé jsou mechanické napodobeniny člověka – *androidy* švýcarských mistrů Piera a Henry Drozů (18. stol.). Jejich automat – písař byl schopen psát perem několik vět a velmi dobře napodoboval člověka.



Obr.2.1. Android - písář P. Droze.



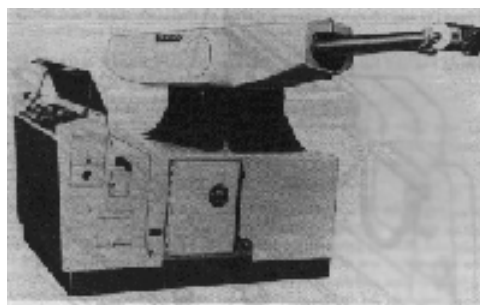
Obr.2.2. Zooid z 18. století.

Mechanické napodobeniny zvířat – *zooidy* jsou ještě staršího data. Po věku mechaniky přispěla k vývoji robotů elektrotechnika.

Rok 1920 je v robotice zásadním mezníkem. Poprvé se objevilo slovo *robot* ve hře Karla Čapka R.U.R. Slovo robot je tak dnes nejznámějším českým slovem na světě. Roboty té doby byly stále hříčky používané většinou na výstavách k přilákání pozornosti návštěvníků. Ale 20. je století velmi racionální a začínají se objevovat první praktické aplikace, které spadají do oblasti robotiky, jsou to *teleoperátory* pro manipulaci s radioaktivními a jinými nebezpečnými materiály (1940-7). Pak už jde vývoj velmi rychle.

V r. 1949 je zahájen výzkum numericky řízených obráběcích strojů.

V r. 1961 je dán do provozu první **průmyslový robot** UNIMATE u firmy General Motors. Vývoj tohoto robota je spojen se jmény G. Devol, J. Engelberger a universitou Columbia University U.S.A.

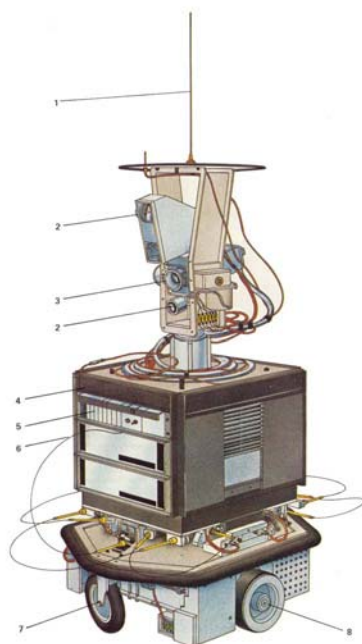


Obr.2.3. Průmyslový robot UNIMATE.

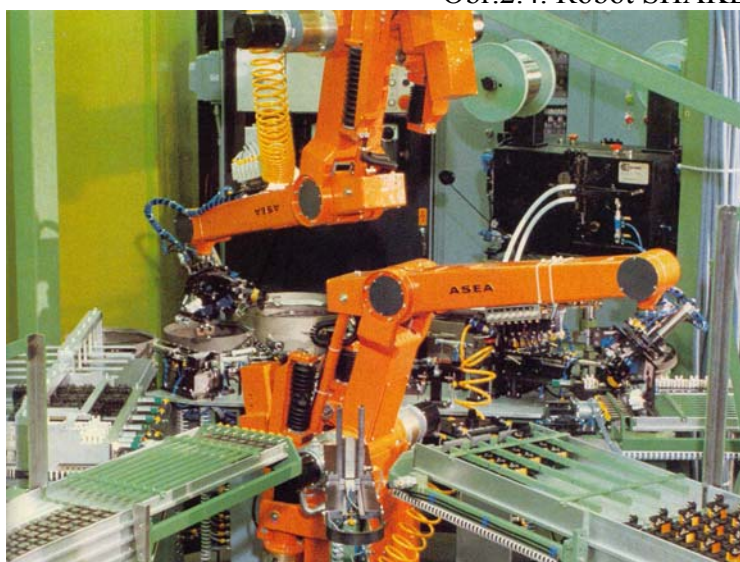
V r. 1964 jsou otevřeny laboratoře umělé inteligence (UI) na Massachusetts Institute of Technology (M.I.T.), Stanford Research Institute (S.R.I.) a dalších institucích v U.S.A. Mají se zabývat m.j. využitím UI v robotice.

V r. 1968 je postaven na S.R.I. mobilní robot Shakey vybavený viděním.

V r. 1977 dává do prodeje své velmi zdařilé roboty evropská firma ASEA.



Obr.2.4. Robot SHAKEY.



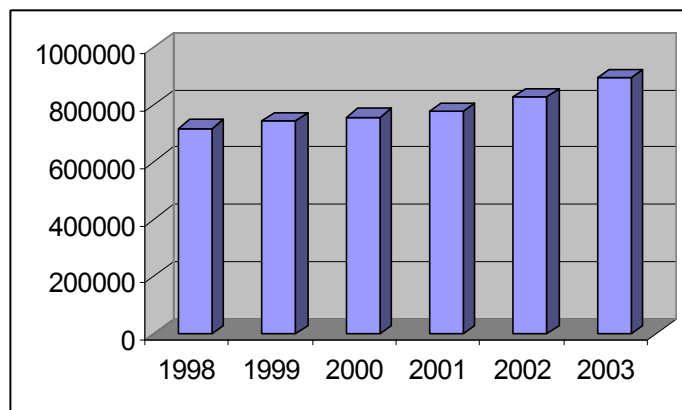
Obr.2.5. Roboty ASEA IRb6 při manipulaci s materiálem.



Obr.2.6. Robot ADEPT koncepce SCARA

V r. 1979 jsou uvedeny na trh roboty koncepce Selective Compliant Articulated Robot Arm (SCARA)

Průmyslové roboty se stávají běžným prostředkem automatizace manipulačních operací především v automobilním průmyslu. Průmyslové roboty jsou masivně používány pro svařování plamenem, elektrickým obloukem, bodové svařování, jsou používány pro nanášení barev a všude tam, kde jsou manipulační operace pro člověka nebezpečné a zdraví škodlivé. Počáteční předstih U.S.A. v ve výzkumu ale hlavně ve využití robotů přebírá Japonsko. 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.



Obr.2.7. Vývoj počtu používaných průmyslových robotů ve světě

Po roce 1980 začínají být první průmyslové roboty vybavovány počítačovým viděním, čidly hmatu a dalšími prvky, které zatím spadaly do oblasti výzkumu UI.

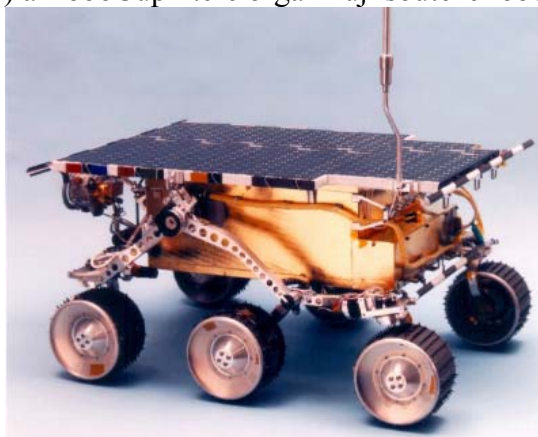
V r. 1995 se objevuje první chirurgický robotický systém pro tzv. minimálně invazivní chirurgii.

V r. 1997 je na Marsu vysazen robot Sojourner.

Zhruba ve stejném období jsou položeny základy mezinárodním organizací Federation of International Robot-soccer Association (FIRA) a RoboCup které organizují soutěže robotů ve



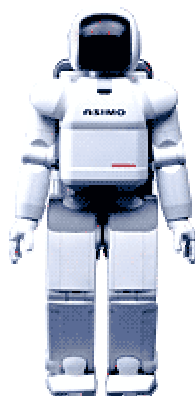
Obr.2.8. Chirurgický robot Zeus.



Obr.2.9. Robot Sojourner.

fotbale. Cílem těchto organizací je především urychlení výzkumu v robotice. RoboCup má dokonce ve své preambuli za cíl aby robotický tým porazil lidský tým – mistra světa v r. 2050 v regulérním fotbalovém zápase.

V r. 2000 předvádí fy Honda svého humanoidního robota ASIMO a SONY předvádí své zoidy AIBO.



Obr.2.9. Robot ASIMO fy Honda.



Obr.2.10. Robot AIBO fy Sony.

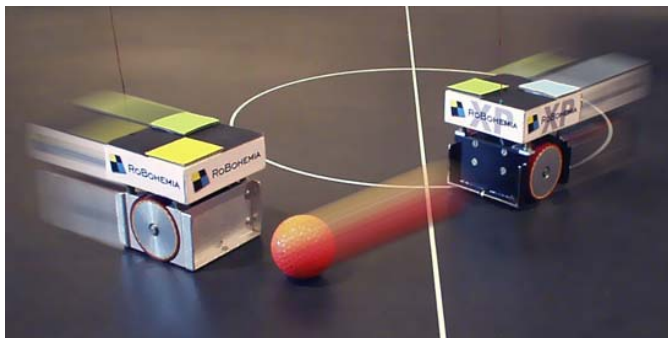
V krátké historické exkurzi jsme se pokusili ukázat vývojový trend robotiky. Zdá se, že konečným cílem robotiky je opravdu postavení stroje, který by téměř nahradil člověka. Cíl se to zdá být pošetilý, ale podobně jako při dobývání měsíce může mít cesta k tomuto cíli celou řadu podružných a přesto významných výsledků. Za výsledek robotického výzkumu můžeme považovat např. pohybové popmůcky, které mají sloužit zdravotně postiženým lidem. Výsledkem a směrem robotického výzkumu jsou např. *exoskeletony* – zřízení, které si člověk na sebe obléká a které mnohonásobně zvýší jeho fyzické schopnosti, především sílu. Perspektivní použití exoskeletonů je rovněž ve zdravotnictví při manipulaci s nepohyblivými pacienty. K robotickému výzkumu patří také výzkum dálkového řízení strojů - robotů na principu *telepresence*. Při takovém řízení získává operátor všechny informace o prostředí ve kterém se robot pohybuje ve formě vhodné pro smysly člověka (zrak, hmat, sluch, čich, chuť) takže má dojem že je skutečně v prostředí které obklopuje robota. Ovládání robota má být stejně dokonalé, operátor prostě provádí totéž co by dělal, kdyby opravdu v prostředí byl. Takto řízený robot by mohl významně pomáhat hasičům a záchranářům.

Také bývalé Československo a posléze vzniklé republiky Česká a Slovenská se podílí na výzkumu v oblasti robotiky. V bývalém Československu to byl hlavně Výzkumný ústav kovopriemyslu (VUKOV) v Prešově, který byl tehdy nositelem celostátního výzkumu v oblasti průmyslových robotů a vyvinul celou řadu průmyslových robotů, poslední APR20. Po rozdělení Československa je výzkum v oblasti robotiky prováděn především na vysokých školách. Na VUT v Brně je prováděn výzkum na fakultě strojní a na Fakultě elektrotechniky a komunikačních technologií (FEKT). Výzkumný tým Ústavu automatizace a měřicí techniky (ÚAMT) vyvinul v krátké době robota UTAR pro výzkum kombinovaného autonomního a teleprezenčního řízení. Fotbalový tým ROBOHEMIA tohoto ústavu je trojnásobným držitelem titulu mistra EVROPY v kategorii MIROSOT – FIRA.

Případné další informace o historii robotiky najde čtenář na webových stránkách např. http://trueforce.com/Articles/Robot_History.htm. Informace o robotickém výzkumu na ÚAMT naleznete na <http://www.feec.vutbr.cz/UAMT/robotics/Welcome.html>



Obr.2.11. Robot U.T.A.R.



Obr.2.12. Fotbaloví roboti týmu RoBohemia.

Exkurzi do historie uzavřeme citováním základních zákonů robotiky tak jak je definoval spisovatel Issac Asimov již v r. 1950 v knize Já robot (I, Robot).

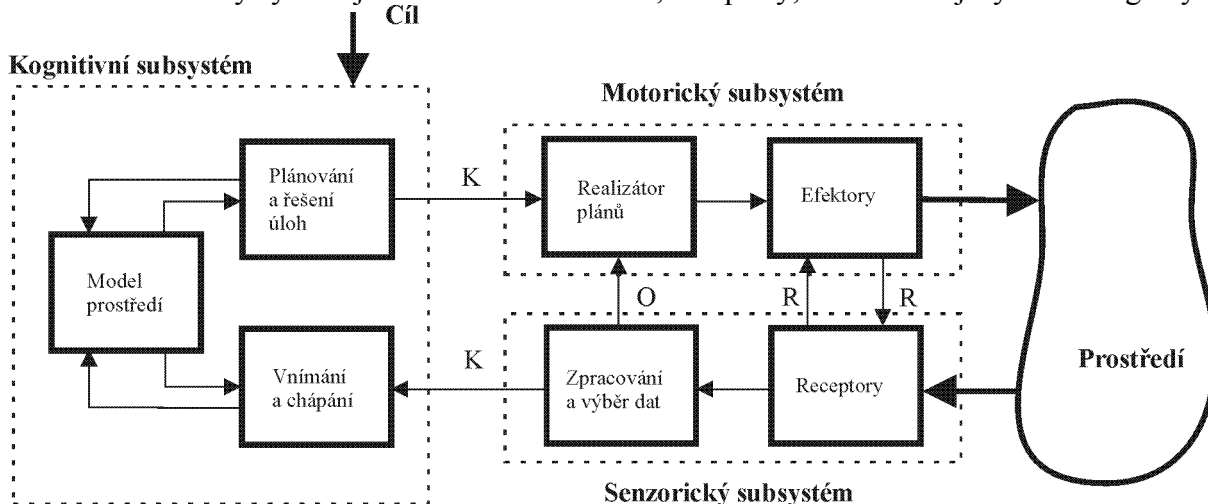
1. Robot nesmí ublížit člověku nebo svou nečinností dopustit , aby člověku bylo ublíženo.
2. Robot musí uposlechnout příkazů člověka, kromě případů, kdy tyto příkazy jsou v rozporu s prvním zákonem.
3. Robot musí chránit sám sebe před zničením, kromě případů, kdy tato ochrana je v rozporu s prvním nebo druhým zákonem.

Tyto zákony, i když jsou definovány spisovatelem sci-fi literatury, by měl ctít každý výzkumník v oboru robotiky.

3 PRŮMYSLOVÉ ROBOTY – ZÁKLADNÍ POJMY

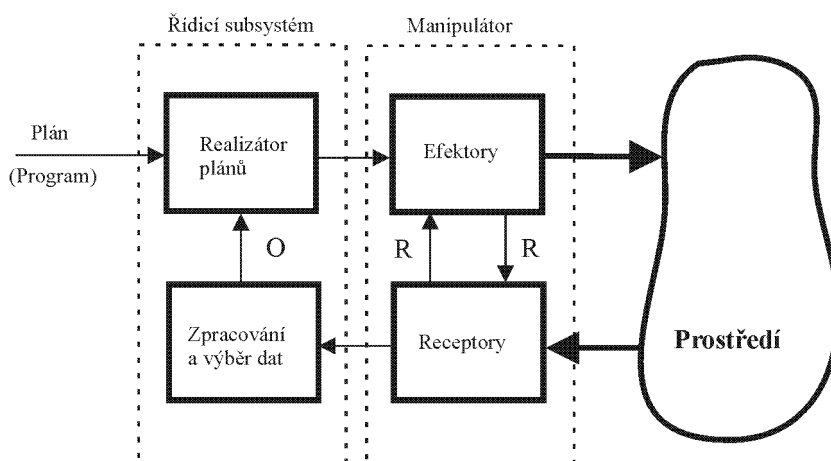
Jak by vlastně měl vypadat robot tak jak jsme jej popisovali v historické exkurzi? Nejvýstižnější popis takového dává blokové schéma z obr.3.1.

Robot, který by měl nahrazovat člověka musí být schopen fyzicky ovlivňovat prostředí ve kterém se robot nachází a v tomto prostředí se pohybovat. To zajišťuje jeho motorický subsystém, ten svými efekty prostředí ovlivňuje. Efekty také zajišťují pohyb robota v prostoru. Robot musí být schopen nějakým způsobem reagovat na prostředí a jeho změny. To zajišťuje senzorický subsystém. Nad těmito systémy je nadřazen kognitivní subsystém ve kterém probíhá rozhodovací a hlavní řídicí činnost. V tomto subsystému je ukryta inteligence robota. Sensorický systém je rozdělen na dvě části, receptory, které snímají fyzikální signály



Obr.3.1. Blokové schéma obecného robotu

z prostředí a převádí je na vhodné vnitřní signály, druhou část tvoří systém zpracování a výběru dat, který vybírá z takových signálů informace důležité pro robota. Příkladem může být snímání prostředí televizní kamerou a vyhodnocení tvaru a polohy předmětu, který má robot uchopit. motorický systém je rovněž rozdělen na dvě části, efekторы které provádějí zásahy do prostředí a realizátor plánů, podle kterým jsou efekторы řízeny. Příkladem může být rameno robota, servomechanizmy a řídicí počítač, který takové rameno řídí. Kognitivní subsystém představuje nadřazené inteligentní řízení. tento subsystém provádí hlubší analýzu informace přicházející ze sensorického subsystému, taková analýza již zahrnuje vnímání a chápání. Tato analýza vyžaduje, aby robot měl vybudován nějaký model prostředí a stanoven cíl své práce. Na základě této analýzy, modelu prostředí a cíle práce se zde také provádí řešení úloh a plán akcí, které nakonec robot provede. Kognitivní systém tak uzavírá nejvyšší smyčku zpětné vazby K, která je potřebná pro inteligentní chování robota. Mezi sensorickým a motorickým systémem existují ještě zpětnovazební smyčky nižší úrovně. Je to tzv. operační



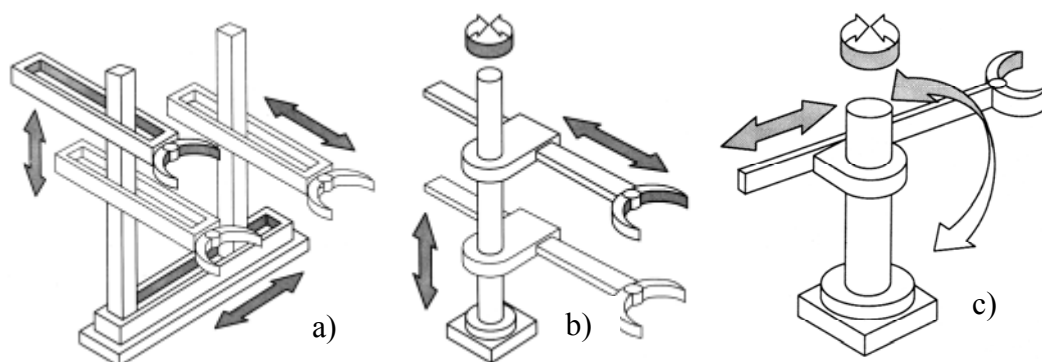
Obr.3.2. Blokové schéma průmyslového robota

smyčka O která zajišťuje vykonání naplánované úlohy. Operační smyčky jsou u robotů představovány např. smyčkami servomechanismů, které pohybují ramenem robota. Nejnižší úroveň řízení představují tzv. reflexivní smyčky R, které řeší základní jednoduché problémy podobně jako u člověka reflexy např. na popálení. Příkladem může být smyčka nárazník – motory, která zastaví pohyb robota při dotyku s překážkou. Podobně jako u člověka, je zapotřebí aby jednotlivé výše popsané subsystémy byly v harmonické rovnováze.

I ty nejlepší, zatím postavené roboty pro výzkumné účely jsou vybavovány jen zárodky kognitivního řízení. Průmyslové roboty nejsou vybaveny ani takovými zárodky. Průmyslové roboty současnosti nejsou tedy vybaveny inteligencí ve smyslu kognitivního robota. Blokové schéma průmyslového robota je nakresleno na obr.3.2. U průmyslového robota zadává robotu plán práce – program člověk. Řídicí subsystém (realizátor plánů a blok zpracování a výběru dat) je tvořen především počítačem v různém provedení. Efekторы spolu s receptory tvoří *manipulátor*, který je počítačem a patřičnou elektronikou řízen. I pro průmyslový robot platí, že všechny jeho subsystémy musí být v harmonické rovnováze.

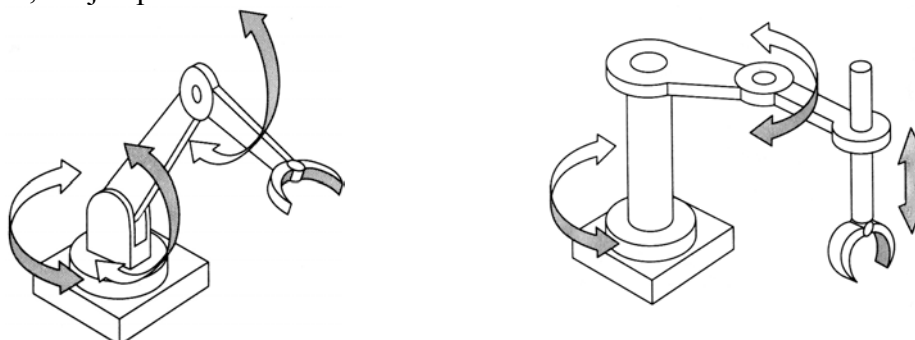
V následující části této kapitoly si uvedeme základní pojmy, které bývají použity přímo jako katalogové údaje průmyslových robotů. Některé z těchto pojmů budou podrobněji vysvětleny a použity v následujících kapitolách.

Velmi důležitou skupinou u průmyslových robotů je mechanická část manipulátoru. Mechanická část manipulátoru je nejčastěji tvořena ramenem a zápěstím s chapadlem. Různé druhy koncepce ramen, zápěstí a chapadel najde čtenář např. v [Šolc, 1990] nebo [Buda, 1985]. Úkolem manipulátoru je zajistit polohování robotem uchopeného předmětu v prostoru. Z mechaniky je známo, že poloha a orientace tělesa v prostoru je charakterizována šesti údaji. Většinou jsou to 3 hodnoty $[x, y, z]$ souřadnic nějakého referenčního bodu tělesa v základním kartézském souřadném systému a 3 úhly $[\alpha, \beta, \gamma]$ natočení nějakého referenčního systému, pevně s tělesem spojeného, vzhledem k tomuto základnímu souřadnému systému. Říkáme, že volné těleso má v prostoru 6 stupňů volnosti. Je tedy zřejmé, že manipulátor musí mít nejméně 6 volně a snadno nastavitelných veličin – proměnných, aby uchopený předmět dokázal volně polohovat, musí mít rovněž 6 *stupňů volnosti* (pojem stupně volnosti bude upřesněn v dalším textu). To je mechanicky zajišťováno tzv. *osami - klouby*, které jsou poháněny - nastavovány pohony. Pozn. u robotů je zvykem používat pojem kloub u obráběcích strojů, pojem osa. Menší počet kloubů než 6 snižuje manipulační schopnosti robota. Počet kloubů je tedy důležitý katalogový údaj. Většinou bývá manipulátor tvořen *ramenem* se třemi klouby a *zápěstím* které má další tři klouby.



Obr.3.3. Základní kinematické koncepce ramen průmyslových robotů
a) kartézská, b) cylindrická, c) sférická

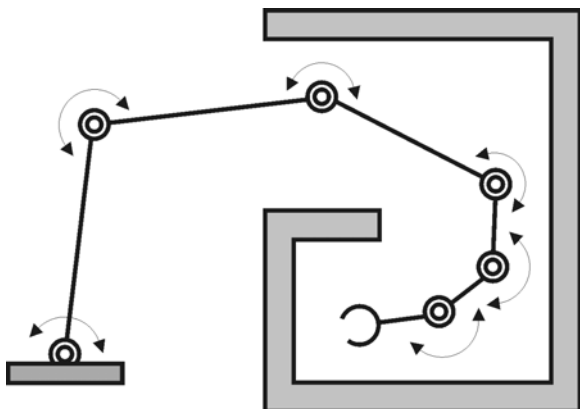
Na obr. 3.3. jsou nakresleny základní kinematické koncepce ramen průmyslových robotů. Každé rameno je na tomto obrázku zakončeno chapadlem, které se může jen zavírat a otevírat. Manipulátory na obrázku uvedené, mají jen tři osy. Je zřejmé, že pokud by úkolem robota, vybaveného takovým manipulátorem, bylo přenést a vylít sklenici s vodou nebudou to roboty koncepce a) a b) schopny provést. Robot s koncepcí c) by takový úkol sice provést mohl, ale jen přes své tělo.



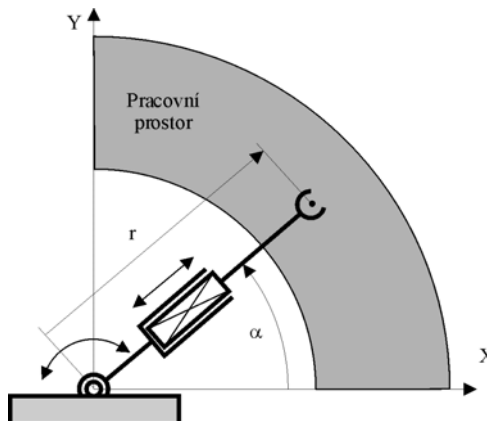
Obr.3.4. Ukázka jiných možných kinematických koncepcí ramen průmyslových robotů.

Při manipulaci je s každým kloubem je spojen údaj o jeho nastavení tzv. *kloubová proměnná*. Kloubové proměnné bývají označovány symbolem q . Kloubové proměnné manipulátorů na obr.3.3. se shodují se souřadnicemi známých souřadnicových systémů, kartézského,

cylindrického a sférického. Odtud jsou odvozeny názvy uvedených koncepcí. Kinematických koncepcí průmyslových robotů existuje celá řada a lze je najít např. v [Šolc, 1990].



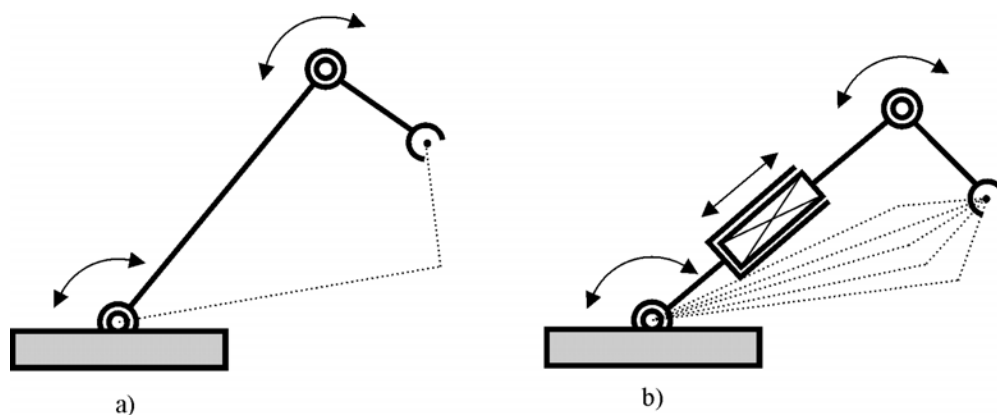
Obr.3.5. Planární manipulátor s šesti klouby.



Obr.3.6. Planární manipulátor se třemi klouby.

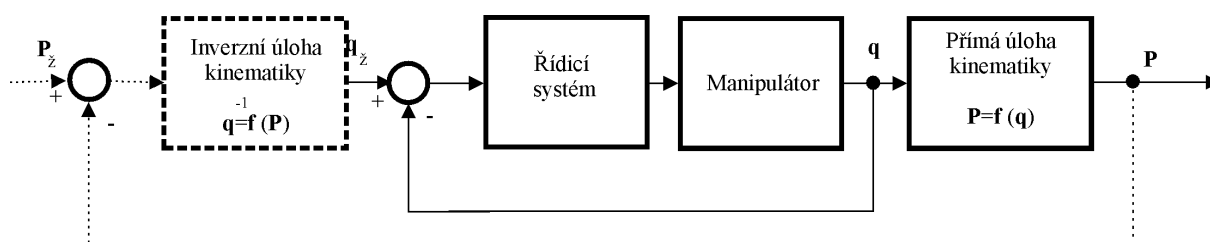
Různé koncepce mají různé výhody a nevýhody a ovlivňují mnohé praktické vlastnosti robotů, např. *spolehlivost*. Koncepce mají vliv i na dosažitelnou *rychlost manipulace*. Více kloubů zvyšuje významně manipulační schopnosti robota. Na obr.3.5. je nakresleno planárního manipulátoru s šesti rotačními klouby. Rameno se může pohybovat pouze v rovině. Je zřejmé, že jeho manipulační schopnosti jsou díky většímu počtu kloubů takové, že může manipulovat za překážkou. Přesto, že rameno má 6 kloubů, nemůže s uchopeným předmětem volně manipulovat v prostoru. Šest kloubů je tedy pouze podmínka nutná, nikoliv však postačující pro volnou – plnou manipulovatelnost s předmětem, klouby zřejmě musí být vhodným způsobem uspořádány. Další omezení pohybu manipulátoru jsou způsobena dorazy a geometrickými rozměry manipulátoru, tato omezení stanovují *pracovní prostor* manipulátoru. U manipulátoru z obr.3.6. je zajištěno z mechanických důvodů možné jen určité vysunutí ramene a zároveň je omezeno natočení ramene.

Důležitou informací, která je u průmyslových robotů uváděna je *způsob programování* resp. *plánování dráhy* robota. Někdy je tento údaj uváděn pod pojmem *způsob řízení* robota. K vysvětlení těchto pojmů si musíme nejprve vysvětlit pojmy přímé úlohy kinematiky a inverzní úlohy kinematiky. Je zřejmé, že znalost kloubových souřadnic nám umožňuje naprosto jednoznačně určit hodnoty souřadnic koncového členu manipulátoru v kartézském prostoru. Označíme-li si vektor kloubových souřadnic $\mathbf{q} = [q_1; q_1; q_1; q_1; q_1; q_1]^T$ (u robota se šesti klouby) a vektor pozice koncového členu robota např. chapadla $\mathbf{P} = [x; y; z; \alpha; \beta; \gamma]^T$ pak existuje jednoznačné zobrazení z prostoru kloubových souřadnic do prostoru kartézských souřadnic, které zapíšeme ve formě $\mathbf{P} = \mathbf{f}(\mathbf{q})$, což představuje 6 rovnic, které jsme u mnoha manipulátorů schopni sestavit z běžnými znalostmi geometrie. Nalezení těchto rovnic je *přímá úloha kinematiky*. Pohyb robota tedy můžeme naprogramovat v prostoru kloubových souřadnic a robot vykoná příslušný pohyb v kartézských souřadnicích. Pro člověka je ovšem přirozenější představit si pohyb a plánovat jej v kartézských souřadnicích. U některých systémů programování musíme tedy řešit obrácenou úlohu tj. ze znalosti pozice $\mathbf{P}$ umět vypočítat hodnoty kloubových souřadnic, to je *inverzní úloha kinematiky*. Tato úloha je mnohem složitější než přímá úloha kinematiky. Inverzní úloha kinematiky může mít více řešení, může mít dokonce nekonečně mnoho řešení.



Obr.3.7. Planární manipulátory s nejednoznačným řešením inverzní úlohy kinematiky

Pro planární robot z obr.3.7.a má inverzní úloha kinematiky dvě řešení, pro planární manipulátor z obr.3.7.b má inverzní úloha dokonce nekonečně mnoho řešení. Při řešení inverzní úlohy musíme samozřejmě uvažovat pozici $\mathbf{P}$ uvnitř pracovního prostoru manipulátoru. Průmyslové roboty jsou programovány a následně řízeny podle schématu na obr.3.8.

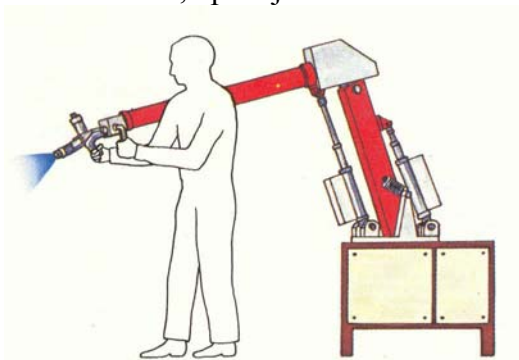


Obr.3.8. Blokové schéma řízení průmyslového robota

Dráha robota je většinou naprogramována a uložena ve formě kloubových souřadnic. Údaje o žádaných hodnotách kloubových souřadnic $\mathbf{q}_z$ jsou spolu s příslušným časem uloženy v paměti robota. Řídicí systém pak při vykonávání programu – plánu zajišťuje že platí $\mathbf{q}(t)$ je prakticky shodné s $\mathbf{q}_z(t)$. Přímou úlohu kinematiky při daném průběhu $\mathbf{q}(t)$ pak vlastně řeší samotný mechanismus manipulátoru. V podstatě existují tři způsoby plánování dráhy robota - programování.

1. *Přímé programování – učení. Přímé učení* bývá prováděno dvěma způsoby:

- a) Obsluha vede rameno a zápěstí robota požadované dráze a žádanou rychlostí. To může být zařízeno tak, že obsluha přímo drží pracovní nástroj v chapadle robota a vykonává s ním operace, které má pak robot opakovat viz obr.3.9. Takto bývají např. programovány roboty určené pro stříkání barvy. Řídicí systém robota si zapamatuje požadovaný pohyb ve formě tabulky údajů $\mathbf{q}_z(t)$ a posléze tento pohyb vykonává podle schéma na obr.3.8. Určitou nevýhodou tohoto způsobu učení je, že člověk musí provádět programovací pohyb dostatečně dokonale, robot všechny jeho případné chyby, jako např. šubnutí rukou, opakuje.



Obr.3.9. Přímé programování robota.

- b) Obsluha navádí robota do požadovaných pozic v prostoru, např. pomocí tlačítek na přenosném programovacím panelu. V požadované pozici, kterou může nastavovat velmi přesně a libovolně dlouho, obsluha stiskne tlačítko „zapamatuj si tuto pozici“. Do paměti robota se tak uloží posloupnost údajů o požadované pozici ve formě poměrně malého počtu údajů $\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2, \dots, \mathbf{q}_n$. K těmto údajům o poloze se před spuštěním robota, v režimu plnění programu, musí dodat ještě vhodným způsobem údaj o čase a případně o způsobu jak mají být body v prostoru propojeny. Tyto dodatečné údaje pak určují jak bude skutečně pohyb vykonávat, v každém případě však projde robot posloupností pozic $\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2, \dots, \mathbf{q}_n$. Výhodou tohoto způsobu učení je, že údaje o pozicích mohou být zadávány velmi precizně a je jich relativně málo. Nevýhodou je, že pohyb mezi těmito pozicemi nemusí být obsluze dostatečně dobře znám. Problém bude demonstrován v příkladu p.3.1.

Při přímém programování řeší vlastně inverzní úlohu kinematiky člověk spolu s mechanismem manipulátoru velmi jednoduchou a přirozenou cestou.

2. *Nepřímé programování – off line.*

Při tomto způsobu programování je programována trajektorie pohybu $\mathbf{P}_z(t)$ ve formě křivek v prostoru, např. podle výkresů. Čas je parametrem těchto křivek a vyplývá z technologického postupu, např. svařování. Off-line je řešena i inverzní úloha kinematiky a údaje $\mathbf{q}_z(t)$ jsou použity pro řízení robota.

3. *Přímé plánování – on line.*

Je podobné předchozímu způsobu s tím rozdílem, že inverzní úloha kinematiky se musí řešit v reálném čase. Takový způsob plánování se používá v případě že robot má svůj pohyb provádět na základě údajů od senzorů ve měnícím se prostředí. Robot má např. uchopit pohybující se objekt a trajektorie objektu není předem známa. Při tomto způsobu plánování dráhy je v obr.3.8. uzavřena i vnější zpětná vazba od pozice $\mathbf{P}$.

Způsoby programování a řízení 1a, 2 a 3 se také nazývají CP (Continuous Path), způsob 1b se nazývá PTP (Point to Point).

Příklad p3.1.

Mějme planárního robota z obr.3.6. Jeho pracovní prostor je určen v kloubových souřadnicích rozsahem $r \in \langle 0,5\text{m}; 1\text{m} \rangle$, $\alpha \in \langle 0^\circ; 90^\circ \rangle$.

Přímá úloha kinematiky (pro polohu v rovině) je vyjádřena vzorci (3.1),

$$\begin{aligned} x &= r \cos \alpha \\ y &= r \sin \alpha \end{aligned} \quad (3.1)$$

inverzní úloha vzorci (3.2).

$$\begin{aligned} r &= \sqrt{x^2 + y^2} \\ \alpha &= \arctg \frac{y}{x} \end{aligned} \quad (3.2)$$

Robot je vybaven velmi jednoduchým PTP řídicím systémem a má např. provádět svařování po přímce rovnoběžné s osou y počínaje bodem o souřadnicích $[0,75\text{m}; 0\text{m}]$ a konče bodem $[0,75\text{m}; 0,6\text{m}]$. Obsluha navede robota na tuto přímkovou dráhu a určí k zapamatování 7 bodů, viz tab.3.1.

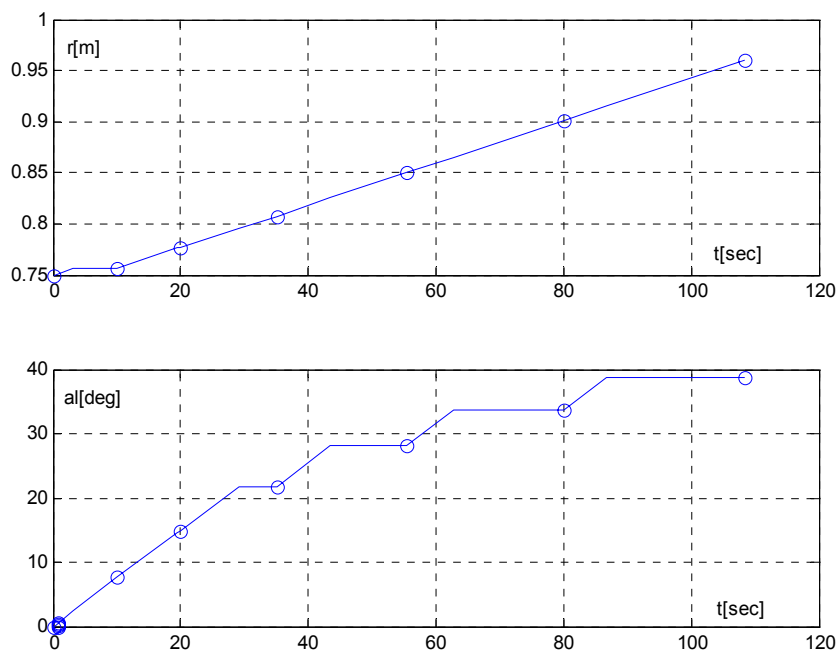
Tab.3.1. Posloupnost naprogramovaných bodů trajektorie manipulátoru

	1	2	3	4	5	6	7
$x[\text{m}]$	0,750	0,750	0,750	0,750	0,750	0,750	0,750
$y[\text{m}]$	0,000	0,100	0,200	0,300	0,400	0,500	0,600
$r[\text{m}]$	0,750	0,757	0,776	0,808	0,850	0,901	0,960
$\alpha[^\circ]$	0,000	7,595	14,931	21,801	28,072	33,690	38,660

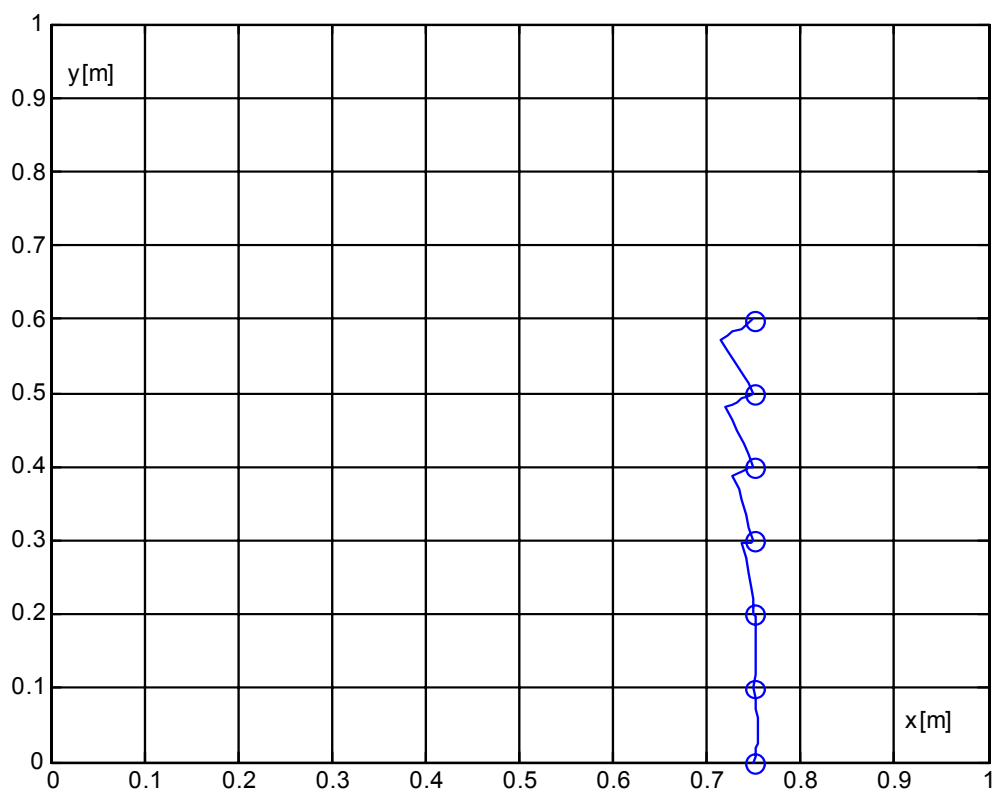
Časové údaje a průběh dráhy jsou v tomto případě definovány tak, že obsluha stanoví jednoduchým způsobem rychlosti pohybu v jednotlivých kloubech. V našem případě jsou to rychlosti v kloubu r 2,1mm/s a v kloubu α 0,75°/s.

Řídicí systém robota polohuje jednotlivé klouby nastavenou rychlostí tak, že kloub který dosáhne naprogramované pozici v čase jako první, zastaví a počká až naprogramovanou pozici dosáhne druhý kloub. Tím je zajištěno, že klouby a koncový člen projdou naprogramovanými pozicemi. Vzhledem k různým rychlostem pohonů kloubů a různým vzdálenostem naprogramovaných bodů v kloubovém souřadném prostoru dochází však k tomu, že dráha mezi naprogramovanými body v kartézském prostoru je pro obsluhu špatně představitelná, viz obr.3.10 a 3.11. Obsluha odhalí tento problém většinou během zkušebního běhu robota a naprogramováním dalších bodů může nevhodný průběh dráhy opravit.

Uváděný způsob programování dráhy byl velmi jednoduchý. U složitějších systémů s tímto typem programování se používá např. proložení naprogramovaných bodů vhodným polynomem a skutečně lze i PTP systém použít pro plynulé svařování.



Obr.3.10. Průběh kloubových souřadnic v režimu plnění programu.

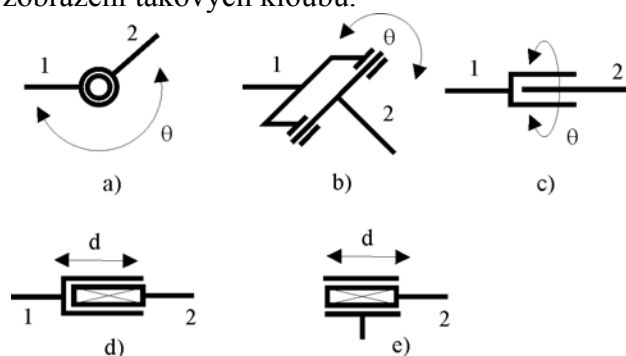


Obr.3.11. Průběh kartézských souřadnic koncového členu manipulátoru v režimu plnění programu.

■

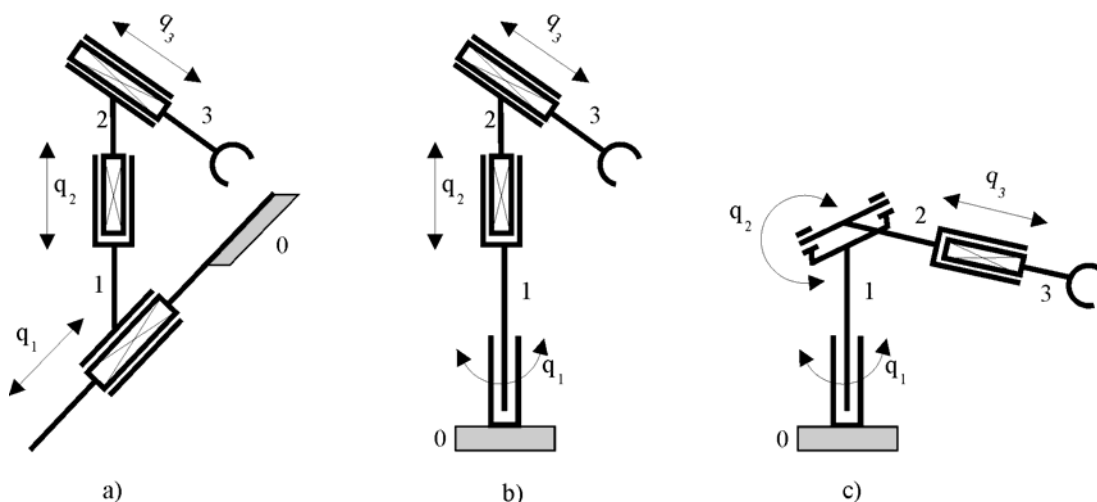
4 KINEMATIKA PRŮMYSLOVÝCH ROBOTŮ

Manipulátor robota představuje *mechanismus*. Tělesa, např. části ramene, z nichž je tento mechanismus tvořen a která jsou vzájemně spojena tak, že se mohou vzájemně pohybovat se nazývají kinematickými *členy* tohoto mechanismu. Dva členy, které jsou vzájemně spojeny a pohybují se vzhledem k sobě, se nazývají *kinematická dvojice*. Kinematické dvojice jsou u průmyslových robotů spojeny *klouby*. Ten kinematický člen, který se nepohybuje a je pevně spojen s prostředím se nazývá *rám*. Takový mechanismus se také nazývá *kinematický řetězec*. Vzájemná poloha dvou členů vázaných kloubem je jednoznačně určena určitým počtem údajů, nejmenší počet těchto údajů *počet stupňů volnosti* kinematické dvojice. Kinematické dvojice, z nichž jsou sestavena ramena a zápěstí průmyslových robotů, jsou téměř výhradně tvořeny členy spojenými *rotačními* nebo *translačními* (prizmatickými) klouby a mají jeden stupeň volnosti. Členy spojené rotačním kloubem se tak mohou vzájemně pouze otáčet kolem osy rotace spojené pevně s jedním členem, členy spojené translačním kloubem se mohou vzhledem k sobě pouze posouvat v ose pevně spojené s jedním členem. Na obr. 4.1. je uvedeno symbolické zobrazení takových kloubů.



Obr.4.1. Symbolické zobrazení rotačních (horní řada) a translačních kloubů (dolní řada) průmyslových manipulátorů.

Toto symbolické zobrazení bude používáno v mírných modifikacích v dalším textu. U každého kloubu je uvedena kloubová proměnná.



Obr.4.2. Základní kinematické koncepce ramen manipulátorů v symbolickém zobrazení.

4.1. Pohyb tuhého tělesa.

Základní úlohou kinematiky je zkoumání vzájemného pohybu členů kinematického řetězce, hlavně pak pohybu koncového členu vzhledem k rámu, v závislosti na kloubových proměnných. Zkoumání provádíme tak, že s jednotlivými členy pevně spojíme kartézské souřadnicové systémy a hledáme vzájemnou pozici těchto souřadných systémů, případně i rychlosti a zrychlení význačných bodů v těchto systémech. Problematiku můžeme řešit použitím vektorového nebo maticového přístupu. Základní myšlenky si ukážeme nejdříve na jednoduchých případech. V dalším předpokládáme existenci dvou kartézských souřadnicových systémů. Systém 0 je pevný, systém 1 je pohyblivý (spojený s nějakým členem kinemat. řetězce). Většinou nás bude zajímat pohyb vzhledem k pevnému systému. Při vektorovém popisu pohybu hraje významnou roli pojem derivace vektoru podle času v těchto prostorech. Jeden a tentýž vektor můžeme vyjádřit v pevném nebo v pohyblivém prostoru (bázi) např.

$$\mathbf{q} = q_{x0}\mathbf{i}_0 + q_{y0}\mathbf{j}_0 + q_{z0}\mathbf{k}_0 \quad (4.1)$$

$$\mathbf{q} = q_{x1}\mathbf{i}_1 + q_{y1}\mathbf{j}_1 + q_{z1}\mathbf{k}_1 \quad (4.2)$$

Derivace rovnice (4.1) podle času je

$$\dot{\mathbf{q}} = \dot{q}_{x0}\mathbf{i}_0 + \dot{q}_{y0}\mathbf{j}_0 + \dot{q}_{z0}\mathbf{k}_0 \quad (4.3)$$

protože báze vektory jsou konstantní. Derivace je vyjádřena vzhledem k pevnému prostoru a nazývá se také absolutní.

Derivace rovnice (4.2) podle času je vzhledem k pohybu báze vektorů

$$\dot{\mathbf{q}} = \dot{q}_{x1}\mathbf{i}_1 + \dot{q}_{y1}\mathbf{j}_1 + \dot{q}_{z1}\mathbf{k}_1 + q_{x1}\dot{\mathbf{i}}_1 + q_{y1}\dot{\mathbf{j}}_1 + q_{z1}\dot{\mathbf{k}}_1 \quad (4.4)$$

První tři členy v rovnici (4.4) představují derivaci vektoru $\mathbf{q}$ v pohyblivém prostoru, označíme ji $\dot{\mathbf{q}}_1 = \dot{q}_{x1}\mathbf{i}_1 + \dot{q}_{y1}\mathbf{j}_1 + \dot{q}_{z1}\mathbf{k}_1$. Tato derivace se nazývá relativní. Je – li úhlová rychlost pohyblivého prostoru $\boldsymbol{\omega}$, lze vyjádřit součet posledních třech členů rovnice vektorovým součinem $\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{q}$. Derivaci vektoru tedy můžeme vyjádřit ve tvaru

$$\dot{\mathbf{q}} = \dot{\mathbf{q}}_1 + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{q} \quad (4.5)$$

Rovnici (4.5) interpretujeme následovně „derivace vektorové veličiny podle času v pevném prostoru je rovna součtu její derivace v pohyblivém prostoru a vektorového součinu úhlové rychlosti pohyblivého prostoru a této veličiny“ viz např. [Brát 1987].

Posuvný pohyb.

Nejjednodušší vzájemný pohyb takových systémů je *posuvný pohyb*. Při tomto pohybu zůstávají osy pevného a pohyblivého se systému stále rovnoběžné viz obr.4.3. a pro báze vektory systémů platí v každém čase

$$\mathbf{i}_0 = \mathbf{i}_1 \quad \mathbf{j}_0 = \mathbf{j}_1 \quad \mathbf{k}_0 = \mathbf{k}_1 \quad (4.6)$$

Pozice bodu P je charakterizována vektorem $\mathbf{p}$ v souřadném systému 0 a vektorem $\mathbf{r}$ v souřadném systému 1 . Posunutí obou systémů je charakterizováno vektorem posunutí $\mathbf{d}$. Vztah mezi vektory je dán vektorovou rovnicí

$$\mathbf{p} = \mathbf{d} + \mathbf{r} \quad (4.7)$$

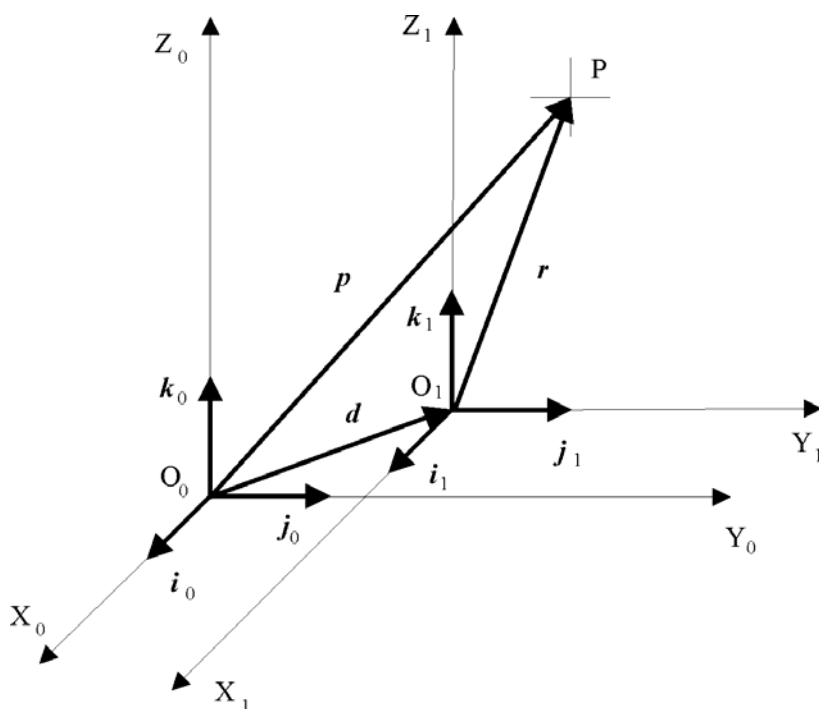
Informaci o rychlosti bodu získáme derivací rovnice (4.7).

Je-li bod P v systému 1 pevný je derivace vektoru $\mathbf{r}$ podle času nulová a dostáváme vztah

$$\mathbf{v} = \dot{\mathbf{p}} = \dot{\mathbf{d}} \quad (4.8)$$

Rychlost pohybu bodu je tedy stejná jako je unášivá rychlost systému 1 . Podobný vztah dostaneme pro zrychlení bodu derivací rychlostí podle času

$$\mathbf{a} = \dot{\mathbf{v}} = \ddot{\mathbf{p}} = \ddot{\mathbf{d}} \quad (4.9)$$



Obr.4.3. Posunutí souřadných systémů

Jestliže se bod P vzhledem k systému 1 pohybuje budou rovnice pro rychlosti a zrychlení obsahovat ještě relativní rychlost a relativní zrychlení bodu vzhledem k systému 1

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{p}} &= \dot{\mathbf{d}} + \dot{\mathbf{r}} \\ \ddot{\mathbf{p}} &= \ddot{\mathbf{d}} + \ddot{\mathbf{r}} \end{aligned} \quad (4.10)$$

Nyní provedeme rozbor posuvného pohybu v maticové formě. Jednotlivé vektory v rovnici (4.7) můžeme vyjádřit jako lineární kombinaci orthonormálních bázevých vektorů ($\mathbf{i}$, $\mathbf{j}$, $\mathbf{k}$), např.

$$\begin{aligned}\mathbf{p} &= p_{x0}\mathbf{i}_0 + p_{y0}\mathbf{j}_0 + p_{z0}\mathbf{k}_0 \\ \mathbf{d} &= d_{x0}\mathbf{i}_0 + d_{y0}\mathbf{j}_0 + d_{z0}\mathbf{k}_0 \\ \mathbf{r} &= r_{x1}\mathbf{i}_1 + r_{y1}\mathbf{j}_1 + r_{z1}\mathbf{k}_1\end{aligned}\tag{4.11}$$

Jednotlivé vektory pak můžeme jednodušeji zapsat jako sloupcové matice jejich souřadnic v dané bázi

$$\begin{aligned}\mathbf{p}_0 &= [p_{x0}; p_{y0}; p_{z0}]^T \\ \mathbf{d}_0 &= [d_{x0}; d_{y0}; d_{z0}]^T \\ \mathbf{r}_1 &= [r_{x1}; r_{y1}; r_{z1}]^T\end{aligned}\tag{4.12}$$

Naším cílem je např. nalezení souřadnic pozice bodu v systému 0 pomocí znalosti souřadnic vektoru posunutí a souřadnic pozice bodu v systému 1 . Za tím účelem vyjádříme rovnici (4.7) pomocí rovnic (4.11)

$$p_{x0}\mathbf{i}_0 + p_{y0}\mathbf{j}_0 + p_{z0}\mathbf{k}_0 = d_{x0}\mathbf{i}_0 + d_{y0}\mathbf{j}_0 + d_{z0}\mathbf{k}_0 + r_{x1}\mathbf{i}_1 + r_{y1}\mathbf{j}_1 + r_{z1}\mathbf{k}_1\tag{4.13}$$

Abychom mohli porovnat souřadnice jednotlivých vektorů, musí být ale vektory vyjádřeny ve stejných bázích. V našem případě jsou relace mezi bázevými vektory dány vzorcem (4.6) Proto můžeme vztah mezi složkami vektorů zapsat v maticové formě

$$\mathbf{p}_0 = \mathbf{d}_0 + \mathbf{p}_1\tag{4.14}$$

Rovnice (4.7)-(4.10) jsou vektorové rovnice a platí bez ohledu na volbu báze. Rovnice (4.14) je maticová a obecně závisí na volbě báze, indexy v této rovnici udávají v jaké bázi je vektor vyjádřen. Rychlosti a zrychlení bodu získáme z rovnice (4.14) derivací podle času.

Rotační pohyb.

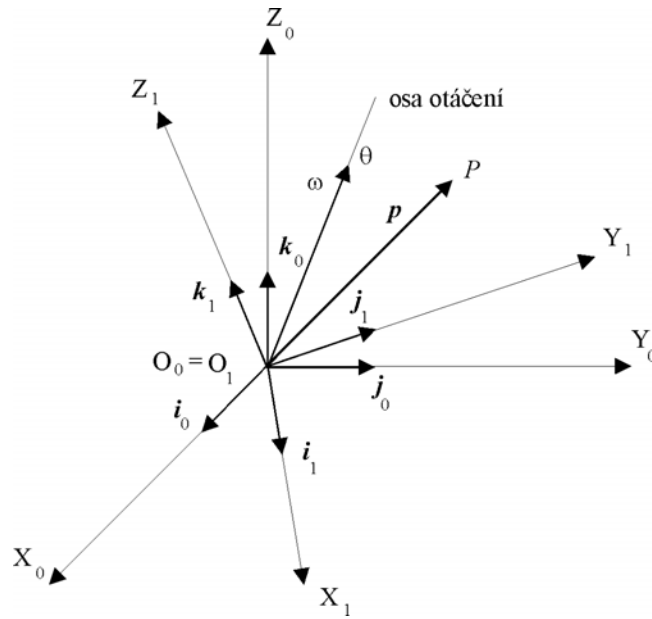
Těleso pevně spojené se systémem 1 koná rotační pohyb, jestliže jedna jeho přímka zůstává trvale v klidu. Tato přímka se nazývá osa otáčení. Pro jednoduchost předpokládejme, že počátky systémů 0 a 1 jsou totožné a osa otáčení jimi prochází viz obr.4.4. Těleso pevně spojené se systémem 1 se otáčí kolem nepohyblivé osy otáčení ve které leží vektor úhlu pootočení θ a vektor úhlové rychlosti otáčení ω .

Vektor $\mathbf{p}$ i vektor ω můžeme vyjádřit v bázi 0 (v nepohyblivém prostoru) nebo bázi 1 (v pohyblivém prostoru). Vyjádření v různých bázích jsou si rovna, platí následující rovnice

$$\begin{aligned}\mathbf{p} &= p_{x0}\mathbf{i}_0 + p_{y0}\mathbf{j}_0 + p_{z0}\mathbf{k}_0 = p_{x1}\mathbf{i}_1 + p_{y1}\mathbf{j}_1 + p_{z1}\mathbf{k}_1 \\ \omega &= \omega_{x0}\mathbf{i}_0 + \omega_{y0}\mathbf{j}_0 + \omega_{z0}\mathbf{k}_0 = \omega_{x1}\mathbf{i}_1 + \omega_{y1}\mathbf{j}_1 + \omega_{z1}\mathbf{k}_1\end{aligned}\tag{4.15}$$

Předpokládejme, že bod P je v systému 1 nepohyblivý. Derivací rovnice (4.15) dostáváme,

$$\begin{aligned}
 \dot{p}_{x0}\mathbf{i}_0 + \dot{p}_{y0}\mathbf{j}_0 + \dot{p}_{z0}\mathbf{k}_0 &= p_{x1}\dot{\mathbf{i}}_1 + p_{y1}\dot{\mathbf{j}}_1 + p_{z1}\dot{\mathbf{k}}_1 \\
 &= p_{x1}(\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{i}_1) + p_{y1}(\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{j}_1) + p_{z1}(\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{k}_1)
 \end{aligned}
 \quad (4.16)$$



Obr.4.4. Vzájemně pootočené systémy

Označíme-li vektor rychlosti $\mathbf{v} = \dot{p}_{x0}\mathbf{i}_0 + \dot{p}_{y0}\mathbf{j}_0 + \dot{p}_{z0}\mathbf{k}_0$, můžeme rovnici (4.16) zapsat ve tvaru

$$\mathbf{v} = \dot{\mathbf{p}} = \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{p} \quad (4.17)$$

Vektor úhlové rychlosti v rovnici (4.17) mění pouze svou velikost, nikoliv však směr. Derivace je v souladu s úvodní interpretací derivace, derivujeme vektor, který je v pohyblivé soustavě pevný, proto je výsledkem pouhý vektorový součin, viz (4.5). Vektory $\boldsymbol{\omega}$ a $\mathbf{p}$ na ve vektorovém součinu musí být vyjádřeny ve stejné bázi.

Derivací rovnice (4.17) podle času získáme zrychlení bodu P .

$$\begin{aligned}
 \mathbf{a} &= \dot{\boldsymbol{\omega}} \times \mathbf{p} + \boldsymbol{\omega} \times \dot{\mathbf{p}} \\
 &= \dot{\boldsymbol{\omega}} \times \mathbf{p} + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{v} \\
 &= \dot{\boldsymbol{\omega}} \times \mathbf{p} + \boldsymbol{\omega} \times (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{p})
 \end{aligned}
 \quad (4.18)$$

První složka v součtech na pravé straně rovnice představuje tečné zrychlení bodu P , druhá složka představuje normálové (dostředivé) zrychlení bodu P .

Předpokládejme nyní, že bod P je v systému 1 pohyblivý. Rovnice (4.15) je stále platná, ale souřadnice vektoru $\mathbf{p}$ v bázi 1 jsou nyní proměnné s časem. Derivace rovnice (4.15) podle času je nyní

$$\begin{aligned}
 \dot{\mathbf{p}} &= \dot{p}_{x0}\mathbf{i}_0 + \dot{p}_{y0}\mathbf{j}_0 + \dot{p}_{z0}\mathbf{k}_0 = \dot{p}_{x1}\dot{\mathbf{i}}_1 + p_{x1}\dot{\mathbf{i}}_1 + \dot{p}_{y1}\dot{\mathbf{j}}_1 + p_{y1}\dot{\mathbf{j}}_1 + \dot{p}_{z1}\dot{\mathbf{k}}_1 + p_{z1}\dot{\mathbf{k}}_1 \\
 &= \dot{p}_{x1}\dot{\mathbf{i}}_1 + \dot{p}_{y1}\dot{\mathbf{j}}_1 + \dot{p}_{z1}\dot{\mathbf{k}}_1 + p_{x1}(\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{i}_1) + p_{y1}(\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{j}_1) + p_{z1}(\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{k}_1)
 \end{aligned}
 \quad (4.19)$$

Rovnici můžeme zapsat ve tvaru

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}_r + (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{p}) \quad (4.20)$$

kde $\mathbf{v}_r = \dot{p}_{xI}\mathbf{i}_I + \dot{p}_{yI}\mathbf{j}_I + \dot{p}_{zI}\mathbf{k}_I$ je relativní rychlost bodu P v soustavě I , druhá složka v rovnici je tzv. unášivá rychlost. Derivace je v souladu s úvodní interpretací derivace, derivujeme vektor, který je v pohyblivé soustavě pohyblivý, viz (4.5).

K získání zrychlení bodu budeme derivovat rovnici (4.20) podle času. Dostáváme

$$\mathbf{a} = \dot{\mathbf{v}} = \frac{d}{dt}[\mathbf{v}_r + (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{p})] = \frac{d}{dt}\mathbf{v}_r + \frac{d}{dt}(\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{p}) \quad (4.21)$$

Vektor $\mathbf{v}_r$ relativní rychlost bodu v pohyblivé soustavě, jeho absolutní derivace podle času bude podle (4.5)

$$\frac{d}{dt}\mathbf{v}_r = \mathbf{a}_r + (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{v}_r) \quad (4.22)$$

Pro derivaci vektorového součinu platí

$$\frac{d}{dt}(\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{p}) = (\dot{\boldsymbol{\omega}} \times \mathbf{p}) + (\boldsymbol{\omega} \times \dot{\mathbf{p}}) \quad (4.23)$$

kde $\dot{\mathbf{p}}$ vyjádříme pro pohyblivý bod podle (4.20). Výsledný výraz pro zrychlení tedy bude

$$\begin{aligned} \mathbf{a} &= \mathbf{a}_r + (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{v}_r) + (\dot{\boldsymbol{\omega}} \times \mathbf{p}) + (\boldsymbol{\omega} \times (\mathbf{v}_r + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{p})) \\ &= \mathbf{a}_r + (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{v}_r) + (\dot{\boldsymbol{\omega}} \times \mathbf{p}) + (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{v}_r) + \boldsymbol{\omega} \times (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{p}) \\ &= \mathbf{a}_r + (\dot{\boldsymbol{\omega}} \times \mathbf{p}) + \boldsymbol{\omega} \times (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{p}) + 2(\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{v}_r) \end{aligned} \quad (4.24)$$

Prostřední dva členy poslední rovnice dávají stejné zrychlení jako vz. (4.18) v případě pevného bodu, tyto členy tedy představují zrychlení dané unášivým pohybem. První člen v poslední rovnici představuje relativní zrychlení bodu v pohyblivé soustavě a poslední člen je tzv. Coriolisovo zrychlení.

Nyní provedeme rozbor rotačního pohybu v maticové formě.

Protože maticový popis je v robotice velmi často používán provedeme si rozbor poněkud podrobněji.

Nejdříve vyjádříme vztah mezi souřadnicemi bodů P v obou systémech. Za tím účelem potřebujeme budeme násobit rovnici (4.15) postupně skalárně bázovými vektory systému θ .

Např. skalární násobení vektorem $\mathbf{i}_0$

$$\mathbf{i}_0(p_{x0}\mathbf{i}_0 + p_{y0}\mathbf{j}_0 + p_{z0}\mathbf{k}_0) = \mathbf{i}_0(p_{xI}\mathbf{i}_I + p_{yI}\mathbf{j}_I + p_{zI}\mathbf{k}_I) \quad (4.25)$$

vede na následující výraz pro souřadnici p_{x0} .

$$p_{x0} = p_{xI}\mathbf{i}_0\mathbf{i}_I + p_{yI}\mathbf{i}_0\mathbf{j}_I + p_{zI}\mathbf{i}_0\mathbf{k}_I \quad (4.26)$$

Výsledkem těchto operací bude následující vztah mezi souřadnicemi vektoru $\mathbf{p}$ v bázích θ a I .

$$\begin{aligned}\mathbf{p}_0 &= \mathbf{R}_{01}\mathbf{p}_1 \\ \mathbf{p}_1 &= \mathbf{R}_{10}\mathbf{p}_0\end{aligned}\quad (4.27)$$

Matice $\mathbf{R}_{01}$ a $\mathbf{R}_{10}$ se nazývají matice rotace a rovnice (4.27) představují transformace vektorů z jedné báze do druhé. Jednotlivé prvky těchto matic jsou skalární součiny bázevých vektorů a představují tedy směrové cosiny úhlů mezi bázevými vektory.

$$\mathbf{R}_{01} = \begin{bmatrix} \mathbf{i}_1\mathbf{i}_0 & \mathbf{j}_1\mathbf{i}_0 & \mathbf{k}_1\mathbf{i}_0 \\ \mathbf{i}_1\mathbf{j}_0 & \mathbf{j}_1\mathbf{j}_0 & \mathbf{k}_1\mathbf{j}_0 \\ \mathbf{i}_1\mathbf{k}_0 & \mathbf{j}_1\mathbf{k}_0 & \mathbf{k}_1\mathbf{k}_0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{R}_{10} = \begin{bmatrix} \mathbf{i}_0\mathbf{i}_1 & \mathbf{j}_0\mathbf{i}_1 & \mathbf{k}_0\mathbf{i}_1 \\ \mathbf{i}_0\mathbf{j}_1 & \mathbf{j}_0\mathbf{j}_1 & \mathbf{k}_0\mathbf{j}_1 \\ \mathbf{i}_0\mathbf{k}_1 & \mathbf{j}_0\mathbf{k}_1 & \mathbf{k}_0\mathbf{k}_1 \end{bmatrix} \quad (4.28)$$

Matice $\mathbf{R}_{01}$ a $\mathbf{R}_{10}$ jsou zřejmě navzájem inverzní a protože skalární součiny vektorů v těchto maticích jsou komutativní tj. $\mathbf{i}_0\mathbf{j}_0 = \mathbf{j}_0\mathbf{i}_0$ atd., platí

$$\mathbf{R}_{01} = (\mathbf{R}_{10})^{-1} = (\mathbf{R}_{10})^T \quad (4.29)$$

Pro každou matici rotace tedy platí $\mathbf{R}^{-1} = \mathbf{R}^T$. Matice pro které platí, že jejich inverze se získá tak, že matici pouze transponujeme se nazývají orthogonální. Pro orthogonální matice a tedy pro každou matici rotace platí následující rovnice

$$\begin{aligned}\mathbf{R}\mathbf{R}^T &= \mathbf{R}^T\mathbf{R} = \mathbf{E} \\ \Rightarrow \det \mathbf{R}^T\mathbf{R} &= \det \mathbf{R}^T \det \mathbf{R} = (\det \mathbf{R})^2 = \det \mathbf{E} = 1\end{aligned}\quad (4.30)$$

Determinant matice rotace je tedy vždy roven 1.

Za pohybu systému I se prvky matice $\mathbf{R}_{01}$ mění s časem a derivací první rovnice (4.27) podle času jsme schopni získat souřadnice vektorů absolutní rychlosti a absolutního zrychlení.

Předpokládejme, že bod P je v systému I nepohyblivý tj. $\mathbf{p}_1 = \text{konst.}$

$$\mathbf{p}_0(t) = \mathbf{R}_{01}(t)\mathbf{p}_1 \quad (4.31)$$

První derivací této rovnice dostáváme složky rychlosti bodu P v systému 0 .

$$\dot{\mathbf{p}}_0(t) = \mathbf{v}_0(t) = \dot{\mathbf{R}}_{01}(t)\mathbf{p}_1 \quad (4.32)$$

Druhou derivací dostáváme složky zrychlení bodu P v systému 0 .

$$\ddot{\mathbf{p}}_0(t) = \mathbf{a}_0(t) = \ddot{\mathbf{R}}_{01}(t)\mathbf{p}_1 \quad (4.33)$$

Předpokládejme, že bod P je v systému I pohyblivý tj. $\mathbf{p}_1 \neq \text{konst.}$

První derivací rovnice (4.31) podle času dostáváme složky absolutní rychlosti bodu P v systému 0 .

$$\dot{\mathbf{p}}_0(t) = \mathbf{v}(t) = \dot{\mathbf{R}}_{01}(t)\mathbf{p}_1 + \mathbf{R}_{01}(t)\dot{\mathbf{p}}_1 \quad (4.34)$$

Derivací rovnice (4.34) podle času dostáváme složky absolutního zrychlení bodu P v systému 0 .

$$\ddot{\mathbf{p}}_0(t) = \dot{\mathbf{v}}(t) = \mathbf{a}(t) = \ddot{\mathbf{R}}_{01}\mathbf{p}_1 + 2\dot{\mathbf{R}}_{01}\dot{\mathbf{p}}_1 + \mathbf{R}_{01}\ddot{\mathbf{p}}_1 \quad (4.35)$$

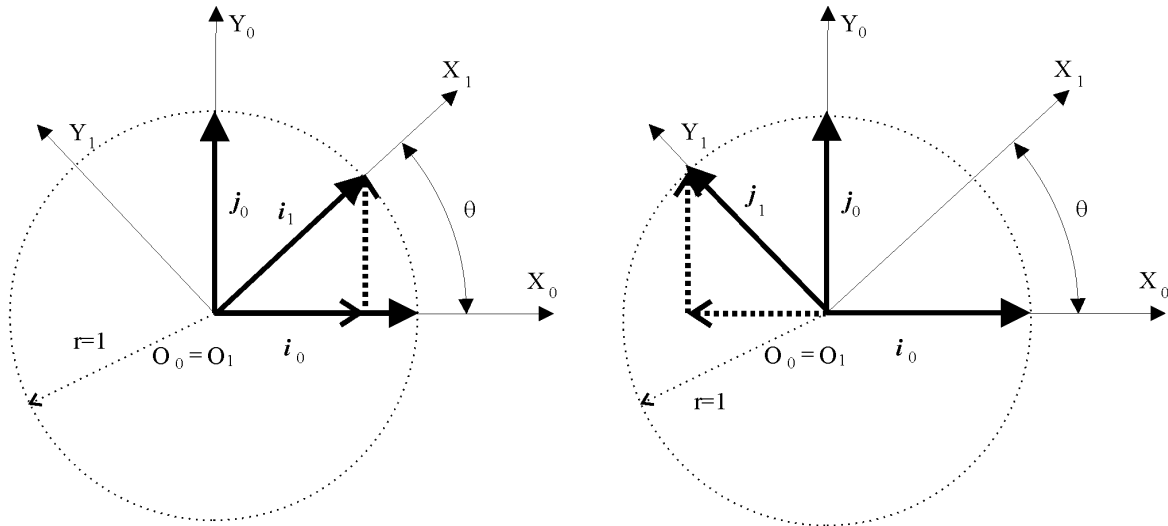
Představme si, že na začátku pohybu jsou oba systémy pevný i pohyblivý totožné. Nejjednodušší rotační pohyb je v takovém případě rotace pohyblivého systému kolem jedné ze společných os, tedy kolem osy X Y nebo Z . Rotační matice v takových případech jsou

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_{01x}(\Theta) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \Theta & -\sin \Theta \\ 0 & \sin \Theta & \cos \Theta \end{bmatrix} \\ \mathbf{R}_{01y}(\Theta) &= \begin{bmatrix} \cos \Theta & 0 & \sin \Theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \Theta & 0 & \cos \Theta \end{bmatrix} \\ \mathbf{R}_{01z}(\Theta) &= \begin{bmatrix} \cos \Theta & -\sin \Theta & 0 \\ \sin \Theta & \cos \Theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4.36)$$

Úhel Θ je úhel vzájemného pootočení systémů.

Příklad p.4.1.

Vypočítejme jak jsou vyjádřeny báze vektory systému I v bázi 0 při jednoduché rotaci systému I kolem totožné osy Z obou systémů, viz obr.



Obr.4.5. Jednoduché pootočení systémů kolem společné osy Z .

Vzájemnou relaci mezi báze vektory můžeme vypočítat přímo podle výše uvedeného obrázku. Je např. zřejmé, že platí $\mathbf{k}_0 = \mathbf{k}_1$. K výpočtu můžeme, ale použít i maticový postup. Pro souřadnice vektoru $\mathbf{i}_1$ v bázi 0 platí

$$\mathbf{i}_{10} = \mathbf{R}_{01z}(\Theta)\mathbf{i}_1 = \begin{bmatrix} \cos \Theta & -\sin \Theta & 0 \\ \sin \Theta & \cos \Theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \Theta \\ \sin \Theta \\ 0 \end{bmatrix}$$

tedy

$$\mathbf{i}_1 = \mathbf{i}_0 \cos \Theta + \mathbf{j}_0 \sin \Theta$$

Pro souřadnice vektoru $\mathbf{k}_1$ v bázi 0 platí

$$\mathbf{k}_{10} = \mathbf{R}_{01z}(\Theta) \mathbf{j}_1 = \begin{bmatrix} \cos \Theta & -\sin \Theta & 0 \\ \sin \Theta & \cos \Theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin \Theta \\ \cos \Theta \\ 0 \end{bmatrix}$$

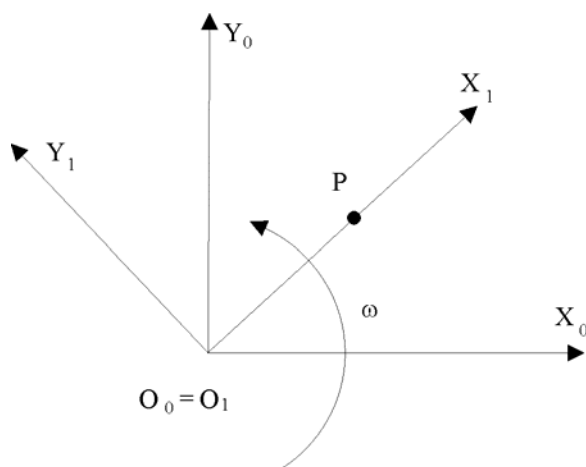
tedy

$$\mathbf{j}_1 = -\mathbf{i}_0 \sin \Theta + \mathbf{j}_0 \cos \Theta$$

♦

Příklad p.4.2.

Na obr.4.6. je nakreslen systém 1, který se otáčí konstantní rychlostí kolem své osy Z, totožné s osou Z systému 0. Na ose X systému 1 je ve vzdálenosti l od počátku pevný bod P. Vypočítejme absolutní rychlost a zrychlení tohoto bodu.



Obr.4.6. Rotační pohyb bodu.

Podle vzorce (4.17) platí

$$\mathbf{v} = \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{i}_1$$

S použitím pravidla o vektorovém součinu dostáváme

$$\mathbf{v} = \begin{vmatrix} \mathbf{i}_1 & \mathbf{j}_1 & \mathbf{k}_1 \\ 0 & 0 & \omega \\ l & 0 & 0 \end{vmatrix} = \omega l \mathbf{j}_1$$

Vektor absolutní rychlosti je zde vyjádřen v bázi l , abychom dostali jeho vyjádření v bázi 0 musím v této bázi vyjádřit vektor $\mathbf{j}_1$. Použijeme výsledky předchozího příkladu a dostáváme

$$\mathbf{v} = \omega l \mathbf{j}_1 = \omega l (-\mathbf{i}_0 \sin \Theta + \mathbf{j}_0 \cos \Theta)$$

Použitím maticového výpočtu dostáváme viz vzorec (4.32)

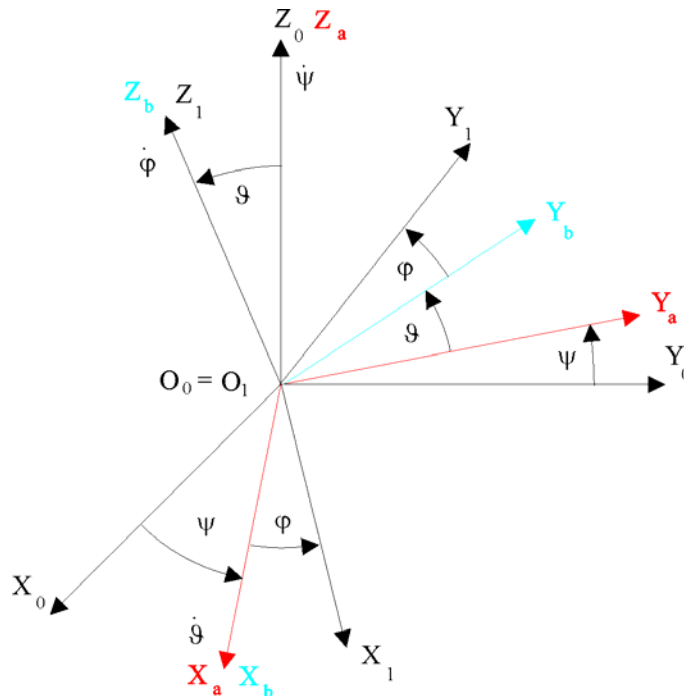
$$\mathbf{v}_0(t) = \dot{\mathbf{R}}_{01}(t) \mathbf{p}_1 = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \cos \Theta & -\sin \Theta & 0 \\ \sin \Theta & \cos \Theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} l \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \omega \begin{bmatrix} -\sin \Theta & -\cos \Theta & 0 \\ \cos \Theta & -\sin \Theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} l \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\omega l \sin \Theta \\ \omega l \cos \Theta \\ 0 \end{bmatrix}$$

Θ je úhel natočení systému l vzhledem k systému 0 .

◆

Sférický pohyb.

Těleso koná sférický pohyb, je-li jeden jeho bod trvale v klidu. tento bod se nazývá střed sférického pohybu. Ke zjištění polohy a rychlosti jednotlivých bodů tělesa si zvolíme souřadnicový systém pevně s tělesem spojeným tak, že jeho počátek bude ležet ve středu sférického pohybu. Vzájemná poloha pevného a pohyblivého systému je stejná jako na obr.4.4. s tím rozdílem, že osa rotace nyní mění svůj směr. Vektorové rovnice pro polohu, rychlost a zrychlení budou podobné rovnicím rotačního pohybu, ale vektor úhlové rychlosti v nich bude měnit nejen svou velikost ale i směr. Pohyb pro jednoduchost vyšetříme pouze pomocí maticového počtu. Souřadný systém spojený s tělesem můžeme do obecné polohy sférického pohybu dostat postupnými rotacemi jak je naznačeno na obr.4.7.



Obr.4.7. Eulerovy úhly.

Systém 0 pootočíme do systému 1 postupně takto. Nejprve pootočíme systém 0 okolo osy X_0 o úhel ψ dostaneme tak systém označený indexem a . Poté pootočíme systém a kolem jeho

okamžité osy X_a o úhel ϑ , dostáváme tak systém označený indexem b . Nakonec pootočíme systém b o úhel φ kolem okamžité osy Z_b a dostáváme obecně pootočený systém l . Tento postup se nazývá *kompozice rotace*.

Jednotlivé úhly, které jsme pro odrotování systému l použili se nazývají Eulerovy úhly a sférický pohyb je určen známe-li tyto úhly jako funkce času. Příslušné vektory úhlových rychlostí postupných rotací leží v osách postupných systémů. Vektor úhlové rychlosti $\dot{\psi}$ leží v ose Z_0 ; vektor $\dot{\vartheta}$ leží v ose X_a a vektor $\dot{\varphi}$ leží v ose Z_l .

Budeme-li nyní chtít znát relaci mezi složkami polohy nějakého bodu (vektoru) v systému l a jeho složkami v systému l můžeme postupovat následovně. Nejprve vyjádříme složky tohoto vektoru v systému b .

$$\mathbf{p}_b = \mathbf{R}_{blz}(\varphi)\mathbf{p}_l \quad (4.37a)$$

Pak vyjádříme složky vektoru $\mathbf{p}_b$ v systému a .

$$\mathbf{p}_a = \mathbf{R}_{abx}(\vartheta)\mathbf{p}_b \quad (4.37b)$$

a nakonec vyjádříme složky vektoru $\mathbf{p}_a$ v systému 0 .

$$\mathbf{p}_0 = \mathbf{R}_{0az}(\psi)\mathbf{p}_a \quad (4.37c)$$

Postupným využitím těchto rovnic dostáváme

$$\mathbf{p}_0 = \mathbf{R}_{0az}(\psi)\mathbf{R}_{abx}(\vartheta)\mathbf{R}_{blz}(\varphi)\mathbf{p}_l = \mathbf{R}_{0l}\mathbf{p}_l \quad (4.38)$$

Rovnice (4.38) tedy představuje postup jakým se pomocí jednoduchých matic rotace vypočítá jejich kompozice a obecná matice rotace sférického pohybu.

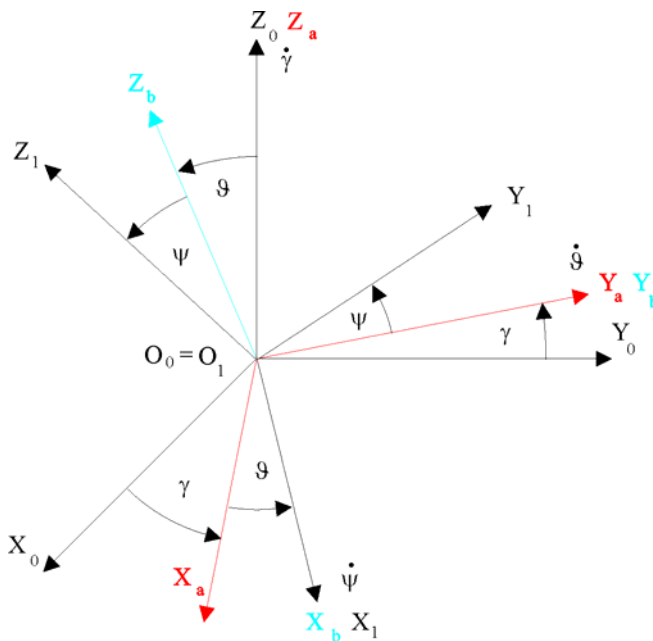
Dosazením za jednoduché matice rotace do vzorce (4.38) a vynásobením těchto matic dostáváme matici rotace sférického pohybu s použitím Eulerových úhlů.

$$\mathbf{R}_{0l} = \begin{bmatrix} c\psi c\varphi - s\psi c\vartheta s\varphi & -c\psi c\varphi - s\psi c\vartheta c\varphi & s\psi s\vartheta \\ s\psi c\varphi + c\psi c\vartheta s\varphi & -s\psi c\varphi + c\psi c\vartheta c\varphi & -c\psi s\vartheta \\ s\vartheta s\varphi & s\vartheta c\varphi & c\vartheta \end{bmatrix} \quad (4.39)$$

V rovnici je místo výrazů $\sin$ a $\cos$ použito zkrácené označení s a c .

Obecné natočení systémů při sférickém pohybu můžeme samozřejmě dosáhnout i kompozicí jiných postupných rotací. Na následujícím obrázku je naznačen postup používající rotace známé z aerodynamiky a mechaniky letu. Obecné natočení tělesa je v tomto případě charakterizováno úhly náklonu γ , sklonu ϑ a zatáčení (vybočení) ψ . V anglické literatuře se pro tyto úhly používají termíny *Roll Pitch* a *Yaw* a pro pohyb charakterizovaný těmito úhly se používá zkratka RPY. Natočení tělesa tímto způsobem je znázorněno na následujícím obrázku. Systém l pootočíme do systému 1 postupně takto. Nejprve pootočíme systém l okolo osy Z_0 o úhel γ dostaneme tak systém označený indexem a . Poté pootočíme systém a kolem jeho okamžité osy Y_a o úhel ϑ , dostáváme tak systém označený indexem b . Nakonec pootočíme systém b o úhel ψ kolem okamžité osy X_b . Názvy jednotlivých úhlů vyplynou, když si systém 1 představíme pevně spojený s letadlem tak, že osa Z je spojená s podélnou

osou letadla a směřuje ve směru letu, osa Y směřuje ve směru pravého křídla a osa X je doplněna tak aby systém byl kartézský. Ve vodorovném letu je pak rovina tvořená osami Z,Y vodorovná a osa X směřuje nahoru. Otáčení kolem osy Z je klonění, kolem osy Y klopení a kolem osy X zatačení.



Obr.4.8. Náklon, sklon, vybočení.

Matice rotace s použitím těchto úhlů je pak

$$\mathbf{R}_{01} = \mathbf{R}_{0az}(\gamma)\mathbf{R}_{aby}(\theta)\mathbf{R}_{b1x}(\psi) = \begin{bmatrix} c\gamma c\theta & -s\gamma c\theta + c\gamma s\theta s\psi & s\gamma c\theta + c\gamma s\theta c\psi \\ s\gamma c\theta & s\gamma c\theta + s\gamma s\theta s\psi & -c\gamma c\theta + s\gamma s\theta c\psi \\ -s\gamma & c\gamma s\theta & c\gamma c\theta \end{bmatrix} \quad (4.40)$$

Výpočet pozice, rychlosti a zrychlení nějakého bodu tělesa v souřadném systému 0 probíhá stejným způsobem jako u rotačního pohybu.

Je zřejmé, že u sférického pohybu se těleso v každém okamžiku otáčí kolem nějaké osy otáčení která prochází počátkem systému 1. V této ose otáčení leží okamžitý vektor úhlové rychlosti tělesa $\boldsymbol{\omega}$, který u tohoto druhu pohybu mění v čase svůj směr.

Příklad P.4.3.

Je zřejmé, že vektor $\boldsymbol{\omega}$ okamžité úhlové rychlosti cylindrického pohybu při použití popisu Eulerovými úhly je vyjádřen následující vektorovou rovnicí

$$\boldsymbol{\omega} = \dot{\psi} \mathbf{k}_0 + \dot{\mathcal{G}} \mathbf{i}_a + \dot{\phi} \mathbf{k}_1$$

Vypočítejme složky vektoru $\boldsymbol{\omega}$ v bázi 0.

K výpočtu nám postačí, když vyjádříme v požadované bázi jednotkové vektory z předchozí rovnice. Rovnici pak budeme moci zapsat ve složkovém tvaru

$$\boldsymbol{\omega}_0 = \dot{\psi} \mathbf{k}_{00} + \dot{\mathcal{G}} \mathbf{i}_{a0} + \dot{\phi} \mathbf{k}_{10}$$

Složky vektoru $\mathbf{k}_0$ v bázi 0 zřejmě jsou

$$\mathbf{k}_{00} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

Složky vektoru $\mathbf{i}_{a0}$ v bázi 0 zřejmě jsou

$$\mathbf{i}_{a0} = \mathbf{R}_{0az}(\psi) \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c\psi & -s\psi & 0 \\ s\psi & c\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c\psi \\ s\psi \\ 0 \end{bmatrix}$$

Složky vektoru $\mathbf{k}_{10}$ v bázi 0 zřejmě jsou

$$\mathbf{k}_{10} = \mathbf{R}_{01} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c\psi c\phi - s\psi c\mathcal{G} s\phi & -c\psi c\phi - s\psi c\mathcal{G} c\phi & s\psi s\mathcal{G} \\ s\psi c\phi + c\psi c\mathcal{G} s\phi & -s\psi s\phi + c\psi c\mathcal{G} c\phi & -c\psi s\mathcal{G} \\ s\mathcal{G} s\phi & s\mathcal{G} c\phi & c\mathcal{G} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s\psi s\mathcal{G} \\ -c\psi s\mathcal{G} \\ c\mathcal{G} \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{\omega}_0 = \dot{\psi} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} + \dot{\mathcal{G}} \begin{bmatrix} c\psi \\ s\psi \\ 0 \end{bmatrix} + \dot{\phi} \begin{bmatrix} s\psi s\mathcal{G} \\ -c\psi s\mathcal{G} \\ c\mathcal{G} \end{bmatrix}$$

Poslední rovnice je tzv. Eulerova kinematická rovnice.

◆

Obecný pohyb.

Obecný pohyb tělesa si nyní můžeme představit jako kompozici posuvného a sférického pohybu. Pohyb si můžeme představit jako přechod systému 0 do systému 1 tak, že systémy jsou na počátku totožné pak je vykonán posuvný pohyb systému 1 a následně jeho cylindrický pohyb okolo počátku již posunutého systému. Základní maticová rovnice pro transformaci vektorů v takto vztažených systémech je pak

$$\mathbf{p}_0 = \mathbf{d}_0 + \mathbf{R}_{01} \mathbf{p}_1 \quad (4.41)$$

Výpočet složek pozice, rychlostí a zrychlení bodů pohybujícího se tělesa počítáme obdobně jako v předchozích případech.

Homogenní transformace a homogenní souřadnice jsou používány především v počítačové grafice. V robotice jsou používány při zpracovávání obrazu snímaného CCD kamerami a při studiu pohybu manipulátorů. V předchozí kapitole jsme se zajímali o popis polohy, rychlosti a zrychlení bodů v různých souřadných systémech. Jak uvidíme později, pro studium pohybu manipulátoru a manipulovaného předmětu je podstatnější znát relaci mezi polohou a orientací různých souřadných systémů. Tato informace je ukryta v matici homogenní transformace.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{p}_0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{01} & \mathbf{d}_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{p}_1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.42)$$
$$\mathbf{H}_{01} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{01} & \mathbf{d}_0 \\ 0 \ 0 \ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.43)$$
$$\mathbf{Trans}(a,b,c) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a \\ 0 & 1 & 0 & b \\ 0 & 0 & 1 & c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.44)$$

$$\begin{aligned}\mathbf{Rot}_x(\alpha) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c\alpha & -s\alpha & 0 \\ 0 & s\alpha & c\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & \mathbf{Rot}_y(\alpha) &= \begin{bmatrix} c\alpha & 0 & s\alpha & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -s\alpha & 0 & c\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ \mathbf{Rot}_z(\alpha) &= \begin{bmatrix} c\alpha & -s\alpha & 0 & 0 \\ s\alpha & c\alpha & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}\end{aligned}\tag{4.45}$$

Podobně jako při studiu rotace, vznikají obecnější MHT reprezentující obecnější vztah souřadných systémů, kompozicí těchto jednoduchých transformací, přičemž musíme dbát na správné pořadí násobení matic. Vzhledem k tomu, že obecná matice homogenní transformace obsahuje ortogonální matice rotace platí pro inverzi MHT následující vztah

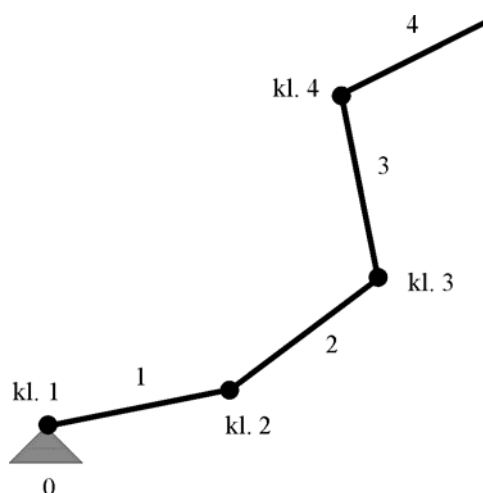
$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{d} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \mathbf{H}^{-1} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}^T & -\mathbf{R}^T \mathbf{d} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.46)$$

Pozn.

MHT používané v počítačové grafice a pro zpracování informace z CCD kamer obsahují ve čtvrtém řádku informaci o perspektivě a měřítku viz následující vyjádření MHT

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \text{Matice rotace} & \text{Vektor translace} \\ \text{Perspektiva} & \text{Měřítko} \end{bmatrix}$$

Běžné použití homogenní transformace je následující. Jednotlivé kinematické členy manipulátoru očíslovíme postupně 0, 1, 2, ... počínaje rámem (pevným členem). Postupně také očíslovíme klouby čísly 1, 2, ... počínaje kloubem mezi rámem a prvním členem, viz obr.4.9.



Obr.4.9. Kinematický řetězec – manipulátor.

Jednotlivým členům kinematického řetězce vhodně přidělíme souřadnicové systémy, které ponesou jejich číslo a budou s nimi pevně spojené. Jednotlivé po sobě jdoucí souřadnicové systémy pak budou vázány homogenními transformacemi, které budou vyjádřeny MHT. Tyto MHT budou funkcemi kloubových souřadnic. Budeme tedy mít MHT $\mathbf{H}_{01}(q_1)$, $\mathbf{H}_{12}(q_2)$, ... (v popisu předpokládáme klouby s jedním stupněm volnosti). K získání MHT mezi koncovým členem a rámem pak použijeme součin MHT podle pravidla kompozice pohybů.

$$\mathbf{H}_{0n} = \mathbf{H}_{01}(q_1)\mathbf{H}_{12}(q_2)\mathbf{H}_{23}(q_3) \dots \mathbf{H}_{n-1,n}(q_n) = \mathbf{H}_{0n}(\mathbf{q}) \quad (4.47)$$

Konkrétně pro manipulátor z obr.4.9.

$$\mathbf{H}_{04} = \mathbf{H}_{01}(q_1)\mathbf{H}_{12}(q_2)\mathbf{H}_{23}(q_3)\mathbf{H}_{34}(q_4) = \mathbf{H}_{04}(\mathbf{q})$$

Vhodné přidělení souřadnicových systémů bývá provedeno podle Denavit-Hartenbergovy konvence. Tato konvence říká že systém $i-1$ a systém i ($i = 1, 2, \dots$) mají být voleny tak, aby bylo možné systém $i-1$ převést do systému i následujícími po sobě jdoucími pohyby kolem postupných – okamžitých os: rotací kolem osy Z , translací podél vzniklé osy Z , translací podél vzniklé osy X a rotací kolem vzniklé osy X . MHT popisující transformaci mezi takto vztaženými systémy se pak nazývá Denavit-Hartenbergova matice (DH) a je vyjádřena jako součin jednoduchých MHT

$$\mathbf{H}_{i-1,i} = \mathbf{Rot}_z(\Theta) \mathbf{Trans}(0,0,d) \mathbf{Trans}(a,0,0) \mathbf{Rot}_x(\alpha) \quad (4.48)$$

DH matice je tak funkcí 4 parametrů z nichž jeden bude zřejmě kloubová proměnná q_i .

K přidělení souřadnicových systémů jsou uváděna tato doporučení:

Jsou-li členy spojeny rotačním kloubem i , volíme osu Z_{i-1} tak aby procházela osou rotace kloubu i . Osu X_{i-1} volíme tak, aby byla rovnoběžná s osou členu $i-1$, případně byla přímo osou tohoto členu. Osu Y_{i-1} doplníme tak, aby souřadnicový systém $i-1$ byl orthogonální.

Jsou-li členy spojeny translačním kloubem i , volíme osu Z_{i-1} tak aby procházela osou translace kloubu i . Osu X_{i-1} volíme opět tak, aby byla rovnoběžná s osou členu $i-1$, případně byla přímo osou tohoto členu a osu Y_{i-1} doplníme tak, aby souřadnicový systém $i-1$ byl orthogonální.

5 Mobilní robotika

Na rozdíl od stacionárních robotů se mobilní roboty vyznačují tím, že se mohou přemisťovat z místa na místo.

Mobilní roboty obecně rozdělujeme na dva základní typy: autonomní a dálkově ovládané stroje.

Autonomním robotem myslíme zařízení, které na základě instrukcí samostatně vykoná nějakou úlohu. Obvykle se předpokládá, že robot k plnění zadaného úkolu používá prvků tzv. umělé inteligence, tzn. je například schopen se orientovat v neznámém nebo pozměněném prostředí, vyhýbat se překážkám, apod. Je ovšem nutno upozornit na to, že neexistuje uspokojivá a obecně přijatá definice umělé inteligence (pozn. nejčastěji uváděnou definicí je: stroj je považován za stroj s umělou inteligencí jestliže se v různých situacích chová tak, že choval-li by se stejně člověk, považovali bychom to za projev jeho inteligence). Je tudíž velmi obtížné definovat, kdy jde o stroj či chování pouze algoritmické či na bázi umělé inteligence. Je například pravděpodobné, že uvidí-li člověk bez technického vzdělání magneticky naváděný automatický vozík v továrně na automobily, podlehne iluzi, že jde o “myslící” robot. Skutečnost je však taková, že robot obsahuje průmyslový automat, je naváděn pomocí magnetického pásu na nebo v zemi a jediným projevem jeho inteligence je jeho schopnost zastavit se před případnou překážkou.

Naopak dálkově ovládané či řízené stroje jsou zpravidla roboty bez inteligence či vyšších algoritmů řízení a rozhodování, které pracují čistě podle povelů operátora. Zastánci operátorsky řízených strojů zpravidla operují tím, že umělá inteligence je prozatím příliš vzdálená lidské a není ani příslib dostatečně rychlého nárůstu kvality umělé inteligence. S tímto tvrzením lze v zásadě souhlasit. Dle mínění autora je situace asi taková, že mluvíme-li o obecné umělé inteligenci a představujeme si při tom stroj, který by svým “rozumem” a vnímáním plně nahradil člověka, je možno předpokládat, že nenastane-li podstatný přelom v příslušné vědní disciplíně, nebude v blízké době něco podobného možné zkonstruovat. Na druhou stranu vede vhodné použití metod umělé inteligence k výsledkům prokazatelně převyšujícím kvality člověka v dané oblasti. Jako příklad je možno uvést speciální algoritmy počítačového vidění, které v kombinaci s výkonným výpočetním nástrojem rozpoznávají objekty mnohem rychleji a zároveň přesněji než člověk. Je tedy vhodné se zamyslet nad tím, není-li vhodnější místo pouhé snahy kopírovat lidskou bytost výhodnější pokusit se sestrojít stroje, které by člověka daleko předčily v některých speciálních oblastech. Jistou paralelu je možno najít u hojně používaných průmyslových robotů. Rozhodně není možno říci, že by tyto stroje byly podobné člověku – maximálně nalezneme jistou podobnost s lidskou rukou. Přitom však tyto stroje dalece překračují výkonnost člověka v mnoha úlohách. Podobně by tomu mohlo být i u mobilních robotů. Nejeví se tedy příliš výhodné sestrojít umělého člověka kopírujícího věrně svoji předlohu (nakonec lidí je na této planetě spíše více než se jeví jako optimální...; navíc se mimochodem patrně nikdy nepodaří ani přiblížit cenu humaidních robotů ceně surovin potřebných pro “vývoj”-tedy růst člověka). Jako správnější cesta se jeví snaha vyvinout stroj ve speciálních oblastech výkonnější než člověk s tím, že tento bude patrně pro zachování nízké ceny méně univerzální. Jiná situace však nastává např. v případě, kdy je potřeba prozkoumat oblast pro člověka nepřístupnou či nebezpečnou. V takovém případě je často vhodné použít dálkově řízený robot ovládaný operátorem. Jako výhodné se dále jeví doplnit stroj alespoň základní umělou inteligencí pro případ ztráty signálu – viz. níže v textu.



Obr. Joystick Microsoft Sidewinder Forcefeedback Pro se silovou zpětnou vazbou ve dvou osách

Speciálním typem dálkového ovládání je tzv. teleprezence či teleprezenční řízení. Jde o sofistikované dálkové ovládání strojů za pomoci prvků používaných ve virtuální realitě. Obecnou snahou je vytvořit takové uživatelské prostředí, aby se operátor cítil na místě, kde je robot.

Jako pěkný příklad pro demonstraci principů teleprezence je možno uvést vidění. Představme si, že je na robotu elektronicky řízený mechanický naklápěcí systém se třemi stupni volnosti s rychlostí a rozsahem pohybu odpovídajícím fyziologii lidské hlavy. Na naklápěcím systému je umístěna soustava dvou kamer s ohniskovou vzdáleností a viditelným úhlem odpovídajícím lidskému oku – kamery jsou opět prostorově (vzhledem k naklápěcímu mechanismu) umístěny v souladu s lidskou předlohou. Na straně operátora si představme “dokonalou” helmu virtuální reality. Helma tedy pokrývá svými displeji 100% zorného pole operátora, má rozlišení lepší než oko, dokonalé barevné podání a ideální senzory pohybů hlavy. Rovněž přenos dat něčt’ je dostatečně rychlý. Řídicí systém snímá pohyby hlavy a věrně je převádí na pohyby naklápěcího mechanismu. Kamery naopak věrně snímají obrza kolem sebe a věrně ten je věrně přenesen do virtuálních brýlí. Výsledkem je, že jestliže si operátor nasadí příslušné brýle, má zrakový vjem takový, že se cítí být na místě kamer a nikoli na místě, kde se nachází on sám. V našem ideálním případě dokonce není schopen zrakem odlišit, jestli má nasazený ony brýle či ne (nepodívá-li se “sám na sebe”...). Cílem teleprezenčních technik je tedy vytvořit takový systém, který by dokonale změřil, přenesl a nasimuloval data pro daný vjem tak, aby měl operátor pocit svého bytí na místě robotického systému. Naprostým vrcholem by pochopitelně bylo naprosté “ošálení” všech pěti lidských smyslů tak, aby operátor nebyl schopen nijak rozeznat realitu od teleprezence. Je evidentní, že jde o extrémně komplikovaný úkol a (alespoň dle mínění autora) rozhodně není na místě strach z něčeho podobného pro nejbližší roky. Je ještě třeba uvést i možnost tzv. invazivní teleprezence studentům zajisté dobře známé z filmu Matrix. V tomto případě je narušena integrita organismu operátora a příslušné signály jsou vedeny přímo do nervů, čímž se obejde mnoho problémů souvisejících s vhodným drážděním lidských sensorických nervů. V posledních letech byly i v této oblasti zaznamenány značné úspěchy, začíná obecně převládat názor, že tento způsob teleprezence má mnohem větší naději na úspěch v případě požadované “dokonalé imitace prostředí”. Nevýhoda nutnosti zásahu do integrity lidského operátora se však jeví jako dostatečně odstrašující a využití výsledků příslušných výzkumů se předpokládá spíše v některých oblastech medicíny – zejména náhrada ztracených smyslů (pozn. již se např. podařilo slepému člověku implantovat kameru tak, že díky ní viděl).

Jestliže se tedy smíříme s tím, že se nám patrně nepodaří vytvořit teleprezenční systém pro všech pět lidských smyslů, je vhodné si určit priority – určit, které smysly jsou pro danou úlohu nejdůležitější.



Obr. Brýle virtuální reality se dvěma barevnými displeji a inerciálními senzory pro snímání pohybů hlavy operátora

Je obecně známo, že zdaleka nejvíce (cca 90-95%) informací ze svého okolí získává člověk zrakem. Jeví se proto jako přirozené, že drtivá většina teleprezenčních systémů bude mít vizuální subsystém (pozn. ve skutečnosti je dosti častý případ, kdy je vizuální informace jedinou přenášenou). V souvislosti se zrakem je nutno si uvědomit několik základních skutečností vycházejících z fyziologie a anatomie člověka a porovnat je s vlastnostmi dostupných kamerových systémů:

- Lidský zrak je poměrně citlivý, pracuje ve značně širokém rozmezí jasů, zpracovává barevnou informaci, při nízkých intenzitách osvětlení však barevná složka mizí a vidíme pouze černobíle. Současné kamery jsou barevné i černobílé, přičemž černobílé jsou citlivější – tento fakt by nahrával použití kombinace obou kamer pro správné přenesení i za nízkého osvětlení. Při nízké hladině osvětlení je navíc u černobílých kamer možnost infračerveného přisvětlení, které člověk nevidí – v praxi je tedy možno dosáhnout větší citlivosti, než má lidský zrak. Celkový rozsah snímatelných jasů tedy v principu není problémem. Zásadní nevýhodou kamer je však nízký maximální rozsah kontrastu, který může být v jednom časovém okamžiku v celé scéně. Jak známo, v kamerách je necitlivost nízkého snímatelného rozsahu jasů částečně kompenzována možností clonění a změny rychlosti závěrky (dnes téměř vždy elektronické - přesněji bychom řekli, že jde o dobu expozice). Ačkoli pro značnou část záběrů v běžném životě tato technika postačuje, je nutno si uvědomit dva její důsledky: při automatických změnách expoziční hodnoty (pozn. souhrnný název pro změnu clony nebo času – fotografové zajisté vědí, že zkrácení doby expozice na polovinu a zvětšení clony o jedno číslo, tj. zdvojnásobení plochy, kterou světlo prochází má za výsledek stejnou expozici – nastavení jsou tedy provázána) zpravidla není člověk schopen rozeznat jaká je skutečná absolutní hodnota osvětlení (jako příklad je možno uvést, že správně exponovaný noční snímek vůbec nemusí být tmavý). Druhou nevýhodou je pak to, že snímáme-li scénu s rozsahem kontrastu větším než je schopna kamera nasnímat, bude část obrazu bez kresby – buď příliš světlá nebo tmavá, či obojí. Dalším problémem je i správné nastavení expoziční

hodnoty (fotografové opět dobře vědí jak může být pojem „správná expozice“ záladný a subjektivní).

- Dále je nutno se zabývat zorným úhlem, který lidské oko či kamera snímá. Lidské oko je schopno vidět prostorový úhel skoro 180°, ovšem pouze v případě stání či při pomalém pohybu. Při vyšších rychlostech se zorný úhel zužuje a při rychlosti 110km/h se uvádí jako poloviční. Jiná situace je u kamer. Zde je při ohniskové vzdálenosti odpovídající lidskému oku (pozn. vzhledem k různým velikostem čipů bývá různá – často bývá uváděn ekvivalent pro kinofilm; zde odpovídá přirozenému vnímání ohnisková vzdálenost přibližně 47mm) zorný úhel vždy menší. Menší zorný úhel mají také téměř všechny zobrazovače videosignálu – od monitorů přes projekční plátna až po helmy virtuální reality. Menší zobrazovaný zorný úhel způsobuje u operátora problémy s orientací, zejména v určování vzájemného úhlu mezi „hlavou robotu“ a „zbytkem trupu“. Člověk je totiž mimo jiné zvyklý vidět periferně své tělo a podle něj se orientuje, nehledě k tomu, že máme dobře vyvinutý cit pro to, jak máme natočenou hlavu vůči zbytku těla (patrně jde o kombinaci vjemů od neuronů snímajících tah ve svaích krku a rovnovážného orgánu).
- Pochopitelným problémem je rozlišení snímání a zobrazování a to jak prostorové tak časové. Zde je nutné si uvědomit jeden velmi nepříjemný efekt zvýšení snímací frekvence či rozlišení; vzroste totiž objem dat, která je nutno přenést od robotu k operátorovi. Vzhledem k tomu, že tento přenos je často prováděn bezdrátově, je nutno použít větší šířku pásma. Vzhledem ke značnému zaplnění vysílacích frekvencí se objevují dostatečně široká povolená pásma až na vysokých kmitočtech (např. 2,4GHz) a takový signál se zase velmi špatně šíří přes překážky.
- Konečně je nutno myslet i na dostatečnou rychlost a přesnost snímání pohybů operátora. Je nutno nejen pohyby rychle změřit, ale také je rychle přenést a dobře uregulovat příslušný naklápěcí systém pro kamery.

Ani u snímání zvuku není situace jednoduchá. Zde by zase mohli mnoho problémů tušit audiofilové. Obecně lze konstatovat, že frekvenční ani dynamický rozsah (potažmo tedy i odstup užitečného signálu od šumu) nezpůsobuje zásadní problémy. V těchto ohledech již je elektronická část bez výraznějších problémů, vyšší cenu a větší pozornost si zasluhují tzv. elektroakustické měniče (tedy mikrofony, sluchátka a reproduktory). Jeví se však být obrovským problémem správná lokalizace směru zdroje signálu. Člověk je schopen poměrně přesně rozpoznat směr, ze kterého daný zvuk přichází a to ve dvou osách. Dokonce jsme schopni „izolovat“ zvukový projev jednoho z různě rozmístěných zdrojů i v případě, že jsou dané zdroje podobně hlasité. Při sebelepším (myšleno ve vztahu k současné zvukové technice) elektronickém přenosu zvukové informace však jsou tyto naše schopnosti velmi silně utlumeny či zcela eliminovány. Jako pravděpodobný problém se jeví tvar elektroakustických snímačů a vysílačů. Nevýhodou je hlavně to, že každý člověk má tvar sluchového orgánu jiný a není tedy patrně dost možné (neinvazivně) zajistit stejné zvukové vjemy různým lidem pomocí jednoho aparátu. I u reproduktorů je situace komplikovaná, protože zde by ideálním řešením bylo pokrýt celé operátorovo okolí elektroakustickým měničem.

Teleprezenčně bývají také přenášeny hmatové informace. Zde je nutno rozlišovat hmatové vjemy, silové vjemy a teplotní vjemy. Každý z nich má zcela jiné charakteristiky. Chceme-li například vyvolat pocit hmotnosti, potřebujeme k tomu výkonný aktuátor. Jestliže např. člověk unese v některém směru 50kg, potřebujeme pro simulaci motor či jiný zdroj síly minimálně o stejném mechanickém výkonu. Frekvence je však v tomto případě v jednotkách desítek hertzů. Zcela jiná situace je však v případě simulace hmatových vjemů. Zde je zaprvé nutné vysoké rozlišení kontaktního pole, které stimuluje hmatové buňky a frekvence signálů

může být v případě simulace velmi jemných povrchů i 2000Hz. Je také například nutno uvážit, na kterou část těla je pole aplikováno, protože zcela jiný počet mechanoreceptorů je v konečcích prstů a na zádech. Mechanoreceptorů je mimochodem pět základních druhů a každý z nich má jiné charakteristiky.

Na okraji zájmu není ani čich a chuť. I zde jsou zkoumány charakteristiky příslušných receptorů a možnosti jejich ovlivnění. Již se například podařilo vyvinout stroj velikosti přibližně osobního počítače, který je schopen vyvinout počet pachů a vůní přibližně odpovídající rozlišení lidského čichu. Senzory pro vnímání pachů mohou být dokonce mnohem citlivější než lidské.

6 Typy mobilních robotů

Mobilní roboty je možno rozdělit podle toho v jakém prostředí se pohybují na roboty operující:

- Na souši (terrestrial)
- Ve vodě (aquatic)
- Ve vzduchu (airborne)
- Ve vesmírném prostoru (space)

Jsou pochopitelně možné i kombinace – např. tzv. obojživelné stroje, tj. vozidla schopná pohybu na souši i ve vodě. Vzhledem k tomu, že naprostá většina ve světě i u nás používaných robotů se pohybuje pouze po souši, bude pozornost věnována pouze jim.

Roboty pohybující se po souši je dále možno rozdělit na platformy kolové (wheeled), pásové (tracked) a kráčející (limbed).

6.1 Kolové platformy mobilních robotů

Mezi mobilními roboty představují ty s koly v roli aktuátorů naprostou většinu. Je skutečně velmi obtížné rozdělit jednotlivé typy kolových podvozků do jednotlivých skupin, budou tedy popsány pouze typy, které se jeví autorům jako nejpopulárnější a nejčastěji používané.

Ještě před popisem jednotlivých typů podvozků je nutno provést alespoň základní roztřídění typů kol. Kola mohou být aktivní či pasivní – tedy hnaná a vlečná (či tlačená). Další důležitou vlastností kol je počet stupňů volnosti jejich pohybu. Běžně používaná kola mohou mít jeden nebo dva stupně volnosti. Kola s jedním stupněm volnosti se mohou otáčet pouze kolem jedné osy, která je paralelní s povrchem, po kterém se kolo pohybuje. Jde-li o kolo se dvěma stupni volnosti, je situace poněkud komplikovanější. Kolo se může pohybovat kolem dvou os paralelních s povrchem – v tomto případě jde o pohyb, který zná každý např. z počítačové myši (nehledě na to, že u myši jde o pohyb pasivní a u robotu může jít i o pohyb aktivní – představte si místo válečků enkodérů pohony). Další možností je jedna osa pohybu rovnoběžná s rovinou povrchu a druhá na ni kolmá. Zde je příkladů více: přední kolo bicyklu, přední kola aut, apod. Je nutno upozornit, že oba dva typy kol se dvěma stupni volnosti

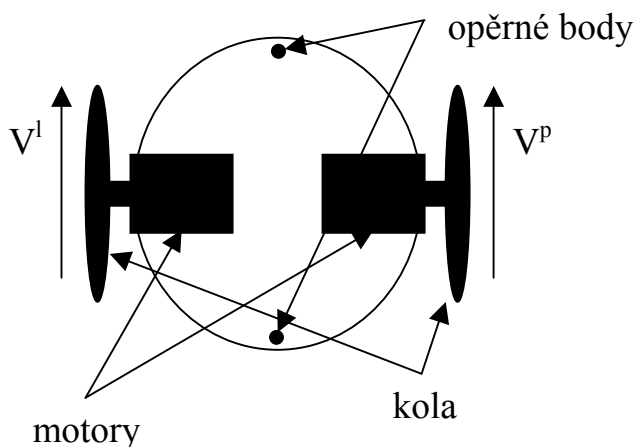
mohou být aktivní či pasivní, vyloučeny nejsou ani případy aktivního pohybu v jedné ose a pasivního ve druhé.

6.1.1 Diferenciální podvozek (differential drive)

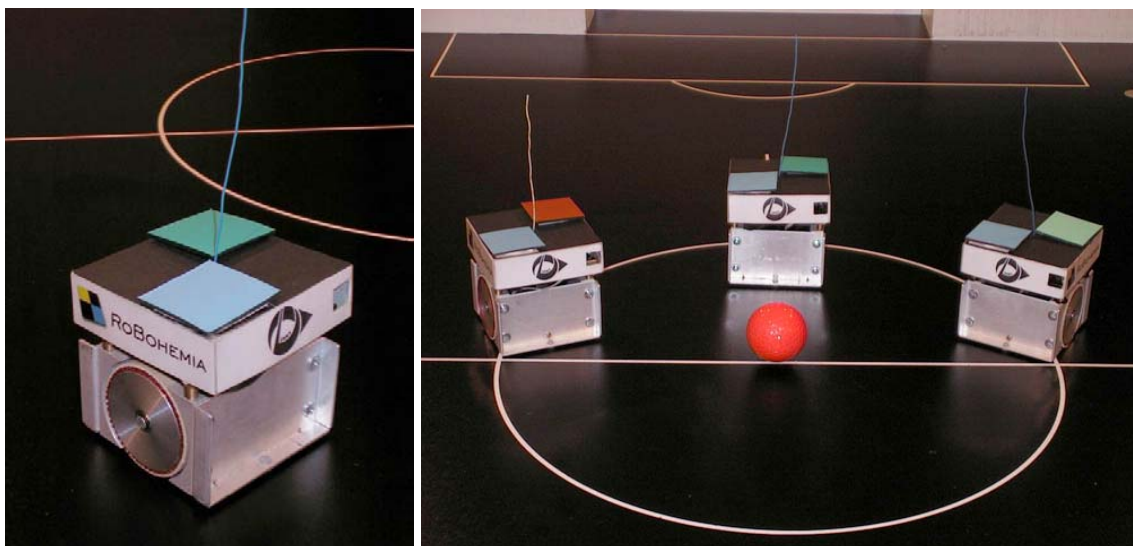
Jde patrně o nejjednodušší rozhodně o nejpoužívanější typ podvozku pro mobilní roboty. Je velmi často používán u malých a levných strojů pro použití uvnitř budov, nejoblíbenější je toto řešení u amatérů a nadšenců, což ovšem zdaleka neomezuje použití tohoto typu uspořádání podvozku i u komplexních komerčních či výzkumných robotů.

Kinematický princip diferenciálního typu podvozku je možno popsat pomocí Obr. Jak je vidět, podvozek obsahuje dvě aktivní kola s jedním stupněm volnosti. Jako pohon jsou nejčastěji používány malé stejnosměrné motory s enkodéry či krokové motory. Při mechanické konstrukci nesmí být opomenuty stabilizační body – buď třecí elementy (často pouhé zaoblené šrouby) nebo kola s jedním či lépe se dvěma stupni volnosti.

Mezi největší výhody diferenciálního podvozku patří kromě velmi jednoduché a robustní konstrukce a nízké ceny také možnost použití velmi jednoduché a přitom relativně přesné odometrie pro navigaci robotu. Tato výhoda je často používána i u poměrně sofistikovaných robotů, kde je však odometrie doplňována nějakou další metodou bez chyby s integračním charakterem. Další nezanedbatelnou výhodou tohoto podvozku je poměrně velmi dobrá manévrovatelnost podvozku. Robot s diferenciálním podvozkem je schopen se otočit na místě. Tato vlastnost bývá ještě posílena tím, že roboty s diferenciálním podvozkem mívají válcovitý tvar, což eliminuje možnost uvíznutí robotu v rozích místností a podobně.



Obr. 6.1 Schematický náčrt diferenciálního podvozku

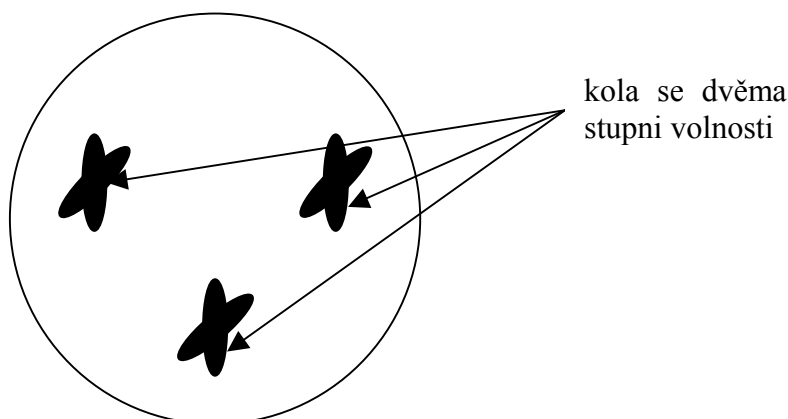


Obr. 6.2 Robotičtí fotbalisti týmů Robohemia a Robohemia XP jsou typickým příkladem robotů s diferenciálním podvozkem, UAMT

Hlavní nevýhodou podvozku je pak jeho neschopnost překonávat vyšší překážky. I robotům o rozměrech srovnatelných s lidskými dělá při použití diferenciálního podvozku problém překonat standardní práh u dveří. Tato nevýhodná vlastnost diferenciálních podvozků je předurčuje zejména pro experimentální využití zpravidla pouze uvnitř budov.

6.1.2 Synchronní podvozek (synchro drive)

U synchronního podvozku má každé kolo dva stupně volnosti. Typická konfigurace tohoto podvozku obsahuje tři kola uspořádaná do tvaru rovnostranného trojúhelníku, tvar robotu bývá obvykle válcový. Všechna kola se otáčejí vždy stejným směrem a stejnou rychlostí, a míří také vždy na stejnou stranu. Synchronizace pohybů jednotlivých kol lze dosáhnout buď elektronicky pomocí vhodně navrženého senzoricko-regulačního systému nebo častěji pomocí vhodného mechanického uspořádání podvozku. Pochopitelnou nevýhodou v případě elektronické synchronizace je potřeba dvou motorů na každé kolo. Při mechanickém provázání pohybů kol je sice složitější mechanická konstrukce, postačí však pouze dva motory pro libovolný počet kol.



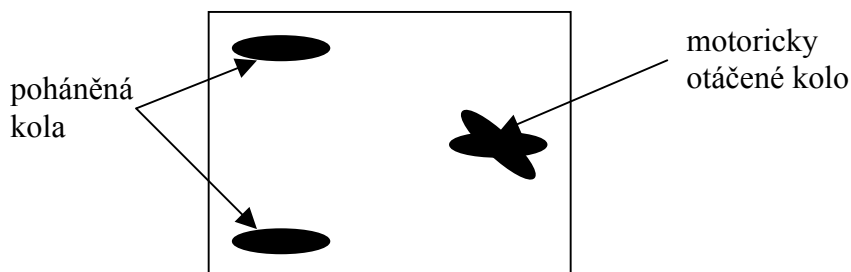
Obr. 6.3 Schematický náčrt typického synchronního podvozku

Velkou výhodou mechanicky provázaného synchronního podvozku je jednoduchost jeho řízení – jeden motor je zodpovědný za rychlost pohybu, druhý za jeho směr; není tedy nutno provádět žádné matematické transformace. Výhodou je také opět velmi dobrá manévrovatelnost podvozku. I nevýhody jsou velmi podobné diferenciálnímu podvozku – podvozek není vhodný pro nerovné povrchy, při nerovnosti projížděné pouze některými koly navíc může dojít k prokluzu ostatních kol.

6.1.3 Trojkolový podvozek s řízeným předním kolem (tricycle drive)

U tohoto podvozku jsou zpravidla hnaná zadní kola a přední kolo je motoricky pouze natáčené, zatímco ve směru pohybu je obvykle odvalováno pasivně.

Výhodou podvozku je jednoduché řízení – opět ovládáme jedním motorem směr pohybu a druhým motorem rychlost jízdy. Tento podvozek již je možno používat v těžším terénu a navíc umožňuje použití poměrně jednoduché a levné odometrie – inkrementálním snímačem je možno snímat pouze rychlost pohybu, pro snímání natočení postačuje potenciometr. Je však pochopitelně nutno počítat s poměrně značnou chybou odometrického měření v případě, že se vozidlo pohybuje v terénu, nárůst chyby způsobí i použití nafukovacích pneumatik. Další nevýhodou trojkolového podvozku je to, že není možná rotace na místě – hrozí tedy uvíznutí robotu v úzkých a „komplikovaných“ prostorách. Rovněž autonomní řízení v takových prostorách představuje poměrně komplikovanou úlohu.



Obr. 6.4 Schéma typického trojkolového podvozku s řízeným předním kolem

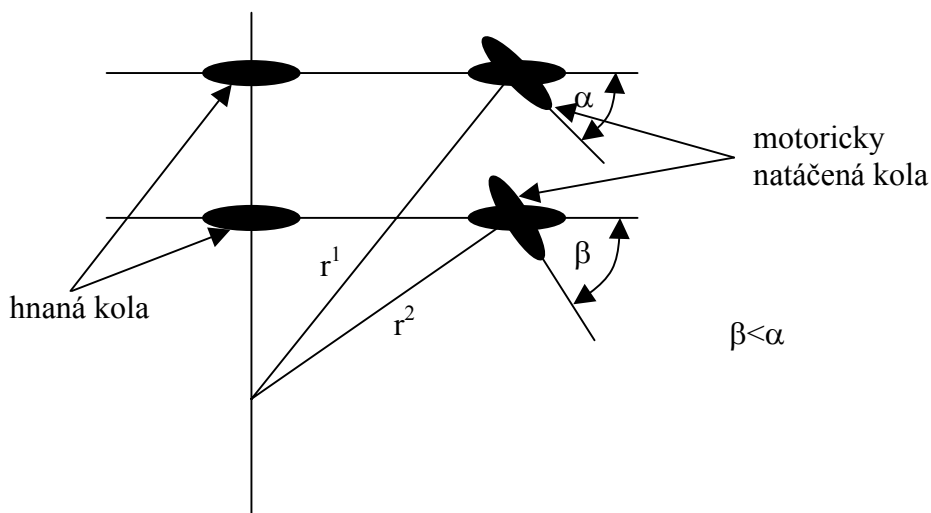
6.1.4 Ackermanův podvozek (Ackerman steering nebo kingpin steering)

Jde o typ podvozku známý z automobilů. V robotice bývá nejčastější uspořádání, kdy jsou hnaná pouze zadní kola a přední kola jsou natáčena každá jiným úhlem protože každé kolo opisuje jinou dráhu (vnitřní kolo musí být otočeno o větší úhel než vnější, jinak řečeno vnější kolo opisuje kružnici s větším poloměrem).

Pozn. Je možno použít i podvozek se stejně natáčenými předními koly, je však nutno počítat s většími prokluzy při zatáčení, problémy se objeví zejména při vyšších rychlostech podvozku robotu. Tento typ podvozku bývá v literatuře označován jako bogey drive.

Ackermanův podvozek bývá používán zejména u větších vozidel u kterých se předpokládá činnost na běžných silnicích s požadovanou velkou nosností nebo činnost v těžším terénu. I zde je možno použít odometrii, v praxi však její použití nebývá příliš běžné, protože větší rozměry vozidla (a obecně obvykle vyšší náklady na takto rozměrný robotický systém)

umožňují použití sofistikovanějších navigačních systémů. Nevýhodou je opět nemožnost otáčení na místě, vzhledem k předpokládanému použití však zpravidla nepředstavuje velký problém.



Obr. 6.5 Ackermanův podvozek s vyznačením různých úhlů natočení předních kol při zatáčení



Obr. 6.6 Teleprezenčně ovládaný minirobot s Ackermanovým podvozkem, UAMT

6.1.5 Podvozky se všesměrovými koly

Jako alternativa k běžně používaným kolům vznikla tzv. všesměrová či složená kola (omnidirectional nebo compound wheels), která umožňují pohyb ve dvou osách. Při vhodném použití takovýchto kol je možno zkonstruovat tzv. všesměrové mobilní platformy. Například kola označovaná jako Mecanum jsou v zásadě běžná kola, která mají na svém obvodu množství pasivních válečků (viz obr. a obr.). Kdyby byly dané válečky zablokovány, chovalo by se takové kolo jako běžné kolo s jedním stupněm volnosti. Kdyby byla naopak zablokována pouze hlavní osa kola, kolo by se mohlo pohybovat pouze v jiném směru. Kombinací těchto dvou mechanismů a vhodným uspořádáním podvozku vzhledem k danému typu kol je možno dosáhnout libovolného pohybu podvozku, tj. podvozek se může pohybovat libovolným směrem a libovolně rotovat, případně vykonávat oba tyto pohyby současně. Je nutno upozornit, že každé kolo je nutno pohánět pouze jedním motorem a jsou nutné celkově

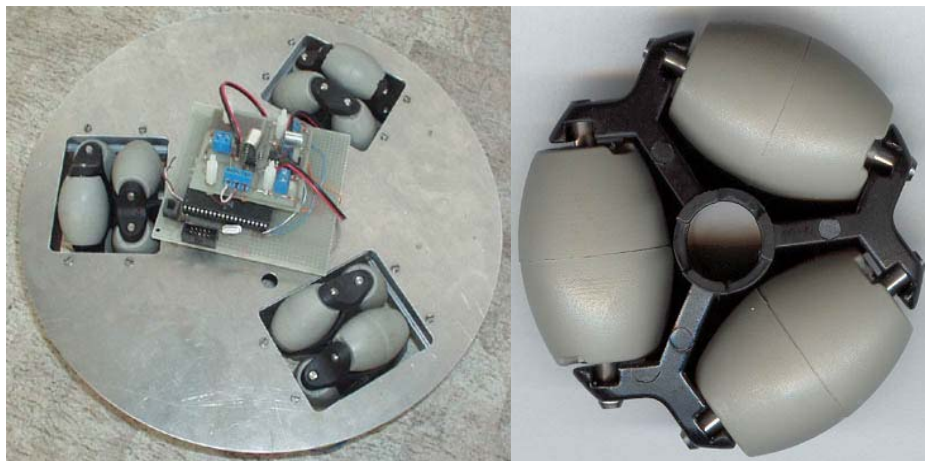
alespoň tři motory. Pozn. Jde o obecný princip – chceme-li při pohybu měnit tři prostorové souřadnice (zde x , y a ϕ), potřebujeme k tomu alespoň tři zdroje pohybu. Pochopitelně by teoreticky bylo možno použít pouze jeden motor a řízené diferenciály, ale v principu je i zde stejný. V praxi jsou používány dva základní typy všesměrových kol typu Mecanum a tím i dva typy podvozků. První typ je zobrazen i s příslušným detailem kola na obr. Zde má kolo obvodové válečky pod úhlem 45° a běžně je používáno uspořádání, kde jsou kola umístěna souběžně v rozích pomyslného čtverce nebo obdélníku. Zde jsou použita čtyři kola, je však možno dokázat, že čtvrté kolo je redundantní a všech typů pohybu je možno dosáhnout i při dysfunkci libovolného jednoho motoru.



Obr. 6.7 Křeslo se všesměrovými koly typu Mecanum (vlevo), detail všesměrového kola (vpravo); zakoupeno na UAMT

Jiný typ všesměrového podvozku i s příslušnými koly je na Obr. Jak je patrné, je zde použit jiný typ všesměrového kolečka, kde jsou pasivní válečky orientovány kolmo na obvod kola. Zde je nutné kola uspořádat obecně do kruhu a minimální počet je opět tři. Použit vyšší počet hnacích kol může být v tomto případě účelné např. pro zvýšení nosnosti, větší robustnost systému, apod.

Nevýhodou obou přístupů je to, že prakticky není možno použít odometrii, protože celý princip pohybu je založen na prokluzu kol, který není možno dostatečně přesně spočítat a navíc do značné míry závisí na lokálních vlastnostech podložky. Pro navigaci strojů se všesměrovými koly je tedy nutno použít jiné metody – např. proximální senzory či inerciální navigaci. Další nezanedbatelnou nevýhodou takovýchto podvozků je jejich naprostá neschopnost pracovat v terénu. Nejvyšší výška překážky, kterou jsou tyto podvozky schopny překonat, je rovna polovině výšky válečku, který je pochopitelně mnohem menší než poloměr celého kola. Přesto jsou všesměrové podvozky poměrně oblíbené zejména pro tzv. mobilní manipulátory, kde se maximálně uplatní jejich schopnost pohybovat se libovolným směrem bez předchozího natáčení platformy.



Obr. 6.8 Minirobot se všesměrovými koly (vlevo), detail všesměrového kolečka (vpravo); vyvinuto na UAMT

6.2 Pásové podvozky (tracked drives)

Kinematika pásových vozidel je obdobná kinematice diferenciálního podvozku. Je možno si představit, že dvě diferenciální kola jsou rozšířena ve dva pásy, které zajišťují lepší kontakt s podložkou. Na rozdíl od kolových podvozků spoléhajících na dokonalý kontakt s podložkou a na odvalování však pásové typy spoléhají spíše na prokluz pásů při otáčení vozidla. Větší kontaktní plocha umožňuje pásovým podvozkům překonávat podstatně větší nerovnosti a stoupat do větších převýšení oproti běžným kolovým podvozkům.

Fakt, že je zatáčení vozidla prováděno smykem způsobuje značné problémy při použití kinematiky vozíku pro výpočet aktuální pozice z pohybů jednotlivých pásů. Jinak řečeno je kvůli značnému prokluzu prakticky nemožné použít odometrii a je tedy nezbytné v případě autonomních strojů použít jinou (a zpravidla podstatně dražší) metodu sebelokalizace. Je sice možno tento problém obejít přidáním pasivním všesměrovým kolem se snímáním jeho pohybů, ztratí se však největší výhoda podvozku – schopnost pracovat v těžkém terénu.



Obr. 6.9 Robot Bujold z University of South Florida je typickým představitelem robotu s pásovým podvozkem

Zatáčení prokluzem má další nezanedbatelný negativní efekt – energetická spotřeba při zatáčení je podstatně (až řádově!) vyšší než při jízdě přímo vpřed, nemluvě o velmi nevýhodném srovnání např. s diferenciálním podvozkem. Tato spotřeba je při nepříznivém typu povrchu vyšší než při stoupání do maximálního sklonu udávaného pro pásové podvozky jako 35° . To neznamená jen rychlejší vybití baterií při častém zatáčení, je také nezbytné dimenzovat všechny části pohonného systému robota na tuto zátěž. Je tedy nutno dostatečně dimenzovat pohony, převodovky, ale také celý elektrický pohonný systém včetně výkonových tranzistorů H-můstků. Odhad dojezdu u pásových podvozků je kvůli tomu také patřičně nepřesný.



Obr 6.10 Robotický systém U.T.A.R. – kolový podvozek s koly s jedním stupněm volnosti provázanými řetězem, vyvinuto na UAMT

Poměrně časté je také používání kolového podvozku s koly s jedním stupněm volnosti provázanými pomocí řetězu nebo ozubeného řetězu. Vlastnosti takového uspořádání jsou potom velmi podobné pásovému podvozku. Pro dosažení terénní průchodivosti velmi podobné pásovému podvozku bývají kola velmi blízko u sebe, aby se dosáhlo efektu podobnému pásům.

6.3 Kráčejíci podvozky (limbed drives)

Po přečtení statí o kolových a pásových podvozcích si může čtenář klást otázku, proč vůbec existuje snaha vyvíjet kráčejíci roboty. Pravděpodobně nejvíce limitujícím faktorem pro použití kolových a pásových podvozků je nutnost neustálého kontaktu kol se zemí po celou dobu pohybu (Pozn. toto tvrzení pochopitelně není možno brát doslova – ne vždy se všechna kola dotýkají neustále povrchu země, jde spíše o vyjádření principu). Na mnoha místech ať už na Zemi např. v pralesích nebo na jiných planetách je však terén natolik komplikovaný, že není možno vždy nalézt trasu, kde je zaručena neustálá fyzická opora pro robot a to i pro případ stroje s pásy. Při použití vhodných kráčejících strojů je však možno zdolat i takové trasy. Tento problém je možno popsat i z jiného úhlu pohledu. Je evidentní, že člověk (představující ideální dvojnohý kráčející mechanismus) má mnohem větší průchodivost terénem než prakticky libovolný pásový či kolový stroj. Je však samozřejmě otázkou, kdy a

jestli vůbec se podaří zkonstruovat umělý dvojnohý kráčející stroj s vlastnostmi (alespoň pohonné části) srovnatelnými s člověkem.

Hlavními parametry u kráčejících podvozků jsou počet nohou a počet stupňů volnosti na každou končetinu.

V souvislosti kráčejícími roboty je nutno definovat pojem statická stabilita: kráčející robot je staticky stabilní jestliže je jeho stabilita zachována v každém časovém okamžiku jeho pohybu, tj. například i v případě, že je pohyb robotu “zmražen” v libovolném časovém okamžiku. Formálně lze říci, že statická stabilita je zajištěna jestliže je projekce těžiště robotu ve všech časových okamžicích uvnitř konvexního polygonu definovaného nohami, které se aktuálně dotýkají podložky. V literatuře bývá často uváděn také pojem zásoba statické stability (static stability margin), což je vzdálenost bodu projekce těžiště od nejbližšího okraje polygonu.

Jestliže je u robotu zajištěna statická stabilita, má tento stroj výhodu, že se nemůže převrhnout např. ani při chybách, které vzniknou při nevhodném sesynchronizování pohybů jednotlivých končetin (pozn. je nutno upozornit na to, že nemusí jít o chyby algoritmu, ale např. o problémy vzniklé při nestejně dlouhých krocích vlivem nerovností povrchu či dokonce uvíznutí některé končetiny). Je možno říci, že velká část kráčejících robotů je řešena jako staticky stabilní.

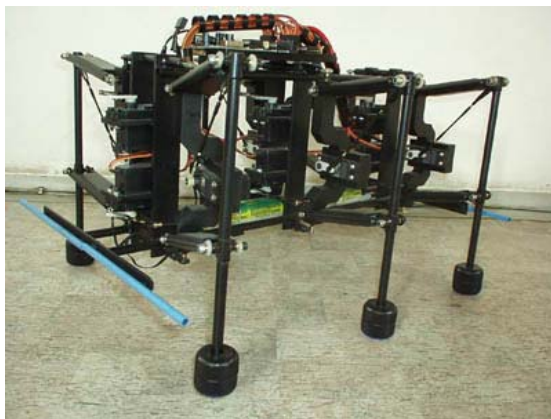
Jestliže je robot udržován v řízené chůzi (čímž se mimo jiné miní i to, že se robot nepřevrátí) a přitom v některých okamžicích neodpovídá definici statické stability, říkáme že jde o stabilitu dynamickou. Je tedy evidentní, že pro dynamickou stabilitu mezi staticky stabilními momenty je nutno využít setrvačnosti hmoty, což ovšem obvykle znamená značné komplikace při návrhu a tvorbě kráčecího mechanismu čítající obvykle složité matematické modelování.

Je však prokázáno, že ačkoli je statická stabilita jednodušší na provedení, limituje jednak postavení “těla” robotu a maximální rychlost a rozsah pohybu. Lze tedy přepokládat (a je to i dobře pozorovatelné na vývoji v oblasti kráčejících robotů), že nastane odklon od staticky stabilních strojů ke strojům s vyřešenou dynamickou stabilitou.

6.3.1 Počet končetin

Počet končetin kráčejícího stroje má pochopitelně velký vliv na jeho “výkonnost“, tedy zejména na maximální rychlost pohybu a terénní průchodivost. V historii byly sestrojeny funkční roboty s jednou končetinou stejně jako se dvanácti. Ačkoli počet nohou není nijak limitován a není ani přijat “obecně uznávaný” optimální počet končetin, je evidentní a logická inklinace k určitým typům a počtům končetin.

Při požadavku statické stability při pohybu je nejnížší počet nohou čtyři (tři nohy pochopitelně mohou být samy o sobě také staticky stabilní, ale jaksi nám potom chybí rezerva pro nohu, která aktuálně provádí přesun ...). Čtyřnohé staticky stabilní řešení však má dvě nevýhody: je nutné “uměle” měnit těžiště (obvykle se provádí pohyb baterie v jedné ose) a pohyb vždy provádí pouze jedna končetina. Pohyb je tedy značně pomalý. Často tedy bývá aplikován šestinohý kráčející robot, kde může být zvednutá v daném časovém okamžiku více než jedna končetina a navíc není nutno přesouvat hmotu robotu pro změnu těžiště, chceme-li dodržet podmínku statické stability.



Obr. 6.11 Kráčející šestinohý minirobot, každá končetina má dva stupně volnosti, vyvinuto na UAMT

6.3.2 Počet stupňů volnosti

Dalším problémem při návrhu kráčejícího robotického systému je, kolik stupňů volnosti by měly mít jednotlivé končetiny. Na jedné straně je vhodný co nejvyšší počet stupňů volnosti, aby byla dostatečná volnost při polohování, na straně druhé je nutno si uvědomit, že každý aktivní stupeň volnosti znamená další pohon, což zvyšuje nejen cenu a složitost systému, ale také jeho hmotnost.

Obecně je možno říci, že u robotů s vyšším počtem končetin (tj. 4-6) jsou používány nohy s nižším stupněm volnosti – zpravidla 1-3, zatímco u robotů dvojnohých se běžně používá 5 stupňů volnosti.



Obr. 6.12 Humanoidní kráčející robot Honda P3: výška 160mm, hmotnost 130kg

7 Součásti mobilních robotů

7.1 Elektromotory

Při popisu motorů je nutno zavést několik pojmů.

Točivý moment (torque) motoru udává točivou sílu, kterou je motor schopen vyvinout a je udávána v newtonmetrech – N.m. Točivý moment se mění nepřímo úměrně s rychlostí otáčení. Je-li motor zastaven, je moment největší a jde o tzv. statický točivý moment (stall torque). Točí-li se motor bez zátěže, je moment při daném napětí a ideálním zdroji proudu nejvyšší; pakliže je napětí rovno nominálnímu, mluvíme o nominálních otáčkách a momentu naprázdno (no load torque). Nejvyšší účinnosti motoru je dosahováno někde mezi těmito dvěma hodnotami.

Často udávanou veličinou je nominální výkon motoru udávaný ve wattech. Další důležitou veličinou popisující kvalitu motoru je jeho účinnost (efficiency).

7.1.1 Stejnosměrné motory (DC motors)

Jsou patrně nejjednodušší na použití, neboť jsou napájeny pouhým stejnosměrným napájením. Uvnitř stejnosměrného motoru jsou pevně umístěné permanentní magnety (stator) a volně se otáčející elektromagnety (rotor). Problém napájení pohyblivých elektromotorů je řešen pomocí tzv. komutátoru.

Stejnosměrné motory jsou nejčastěji používány v malých a středně velkých robotických systémech. Známými producenty stejnosměrných motorů jsou firmy Maxon Motors, Faulhaber a Mabuchi.

7.1.2 Střídavé motory (AC motors)

Nepoužívají komutátor pro fázování motoru. Cyklus je místo toho tvořen řídicí elektronikou. Jejich výhodou oproti stejnosměrným motorům jsou menší rozměry při stejném výkonu a možnost dosažení stejných parametrů při otáčení v obou směrech (pozn. u stejnosměrných motorů je cyklus nastaven pevně, u modelářských motorů navíc často tak, že je výrazně upřednostňován pravotočivý směr otáčení). Nevýhodou je komplikovanější a rozměrnější řídicí a výkonová elektronika a více vývodů se složitějším zapojením.

7.1.3 Krokové motory

Tyto motory umožňují přesné natáčení osy s definovaným rozlišením. Není tedy (obvykle) potřeba inkrementální enkodér. Výhodou je také to, že umožňují zabrzdění osy. Nevýhod je hned několik: motory jsou obecně podstatně pomalejší (mnohdy však jde naopak o výhodu) a mají mnohem nevýhodnější poměr točivý moment/rozměry. Tyto motory však bývají často

používány u malých a lehkých robotů s diferenciálním podvozkem proto, že jsou levné, nepotřebují enkodéry a většinou není rovněž potřebná převodovka.

7.1.4 Servomotory

Takto bývají označovány motory s integrovanou převodovkou a inkrementálním enkodérem. Někdy se servomotorem či servem myslí tento komplet včetně řídicí elektroniky. Velkou popularitu mají v oblasti malých a levných robotů tzv. modelářská serva, která obsahují minimotor, převodovku, potenciometr a řídicí elektroniku v kompaktním pouzdru se třemi vývody (napájení, zem, řídicí signál, kde délka pulsu udává natočení). Serva se primárně nemohou kontinuálně otáčet, jsou určena pouze pro polohování v rozsahu 180° (Graupner) či 120° . Je však možno klasická serva upravit pro kontinuální provoz se zachováním možnosti řídit rychlost otáčení v obou směrech šířkou pulsu. Tato úprava je však u většiny typů nezvratná a je nutno počítat s rychlým opotřebením motorků i převodů, protože tyto nejsou stavěny na kontinuální provoz.

7.2 Baterie a akumulátory

Většina mobilních robotů je koncipována tak, že není nijak dráty propojena se svým okolím – jde tedy o soběstačné jednotky. Z toho vyplývá, že na sobě musí mít energetickou jednotku. Většina dnešních robotů je napájena elektrickou energií a jako její zdroj slouží buď baterie (primární články) nebo akumulátory (sekundární články).

Nejdůležitějšími parametry při výběru vhodných článků jsou kromě ceny a rozměrů také kapacita, maximální proudová zatížitelnost, rychlost samovybití, životnost, u akumulátorů pak počet nabíjecích cyklů.

Primární články se vyznačují tím, že je nelze po vybití znovu nabít (přesněji řečeno nejsou k tomu určeny). Nejčastěji používanými typy baterií jsou zinko-uhlíkové, alkalické a řídčejí lithiové. Alkalické baterie mají přibližně 3x vyšší energetickou hustotu (tj. Při stejném objemu mají třikrát větší kapacitu) a také třikrát větší proudovou zatížitelnost. Alkalické baterie mají také mnohem delší životnost a tedy i nižší samovybití. Lithiové baterie jsou na tom v obou parametrech ještě lépe. Primární články však nemají v mobilní robotice příliš velké uplatnění.

Nejčastěji používanými typy akumulátorů jsou NiCd, NiMh a Pb akumulátory.

NiCd akumulátory jsou poměrně velmi levné, mají vysoký počet nabíjecích cyklů (zpravidla 500 při 10% poklesu kapacity). Jejich jmenovité napětí je pouze 1.2V oproti 1.5V u zinko-uhlíkových a alkalických baterií. Typická maximální kapacita pro článek velikosti AA je 1000mAh. Články mají velmi nízký vnitřní odpor a jsou tedy schopny poskytnout velký proud (běžně desítky ampér). Problémem však je podstatné snižování kapacity při zvyšování teploty (optimální teplota provozu je 15° , při teplotě 40° je kapacita poloviční, při teplotě 60° desetinná). Při nízkých teplotách silně klesá samovybití NiCd článků, které je jinak vysoké. Teplota článku nezávisí jen na teplotě okolí, ale i na rychlosti nabíjení či vybití článku. Proto například není vhodné používat běžné články k napájení motorů s vyšším

výkonem. Existují však také speciální NiCd články určené pro rychlé nabíjení a vybíjení; jsou však dražší a mají menší energetickou hustotu.

Podobné vlastnosti mají NiMh akumulátory. Mají stejné primární napětí 1.2V, větší energetickou hustotu (v současné době až 1700mAh ve velikosti AA), nižší počet nabíjecích cyklů (cca 300 s 10% ztrátou kapacity, při 500 cyklech vykazují asi 70% jmenovité kapacity) a jsou schopny poskytnout menší proud (opět existují speciální typy s podstatně větší proudovou zatížitelností – až 40A u velikosti D).

Oba popsané typy akumulátorů vykazují tzv. paměťový efekt při neúplném vybíjení a je vhodné je po zakoupení tzv. formovat, tj. provést asi tři úplná vybití a nabití.

Olověné akumulátory sestávají zpravidla z více článků o jmenovitém napětí 2V. Existují levnější typy s možností dolévání elektrolytu a tzv. suché neboli gelové hermetické akumulátory, které mohou pracovat v libovolné poloze a jsou bezúdržbové. Tyto akumulátory mají nižší energetickou hustotu než NiCd a NiMh, jsou však levnější a vyrábějí se ve větších kapacitách.

Dalším, poměrně novým, typem akumulátorů jsou tzv. RAM (rechargeable alkaline manganese battery) akumulátory. Mají vysokou kapacitu, napětí 1.5V, poskytují malý vybíjecí proud, jejich samovybíjení je však velmi nízké (asi na úrovni alkalických primárních baterií). Počet nabíjecích cyklů je nízký.

V komerčních elektronických přístrojích (např. mobilní telefony či notebooky) se používají lithium-iontové akumulátory. Mají asi 2x vyšší energetickou hustotu oproti NiCd článkům, napětí 3.6V a poměrně nízký počet nabíjecích cyklů (200-300). Jejich cena je však vysoká a komerční dostupnost prozatím poměrně nízká (jsou vyráběny téměř výhradně ve velkých sériích pro výrobce elektroniky).

Velmi progresivním typem článku je lithium-polymerový akumulátor. Jeho hlavní zvláštností je možnost jeho zapouzdření do nekovových obalů. Akumulátor tedy může mít prakticky libovolný tvar, její vnitřek je ve formě gelu. Proudová zatížitelnost je prozatím asi 1A a jmenovité napětí 3.6V.

7.3 Senzory polohy pro mobilní a stacionární roboty

7.3.1 Potenciometry

Potenciometry představují zpravidla nejlevnější a nejjednodušší řešení pro měření úhlu rotace vzájemně spojených součástí za předpokladu, že zde nedochází ke kontinuálnímu otáčení. Senzor pracuje na principu proměnného děliče napětí, kde je prostřední pin elektricky spojen se sběračem, který se pohybuje po odporové dráze v závislosti na pohybu osy potenciometru. Ačkoli jsou vyráběny potenciometry s několika typickými průběhy odporu v závislosti na natočení (logaritmický, exponenciální, sinusoidní,), nejčastěji používaným typem ve funkci senzoru je lineární potenciometr.

Potenciometry je možno rozdělit na typy s drátovým vedením, kde je možno z principu dosáhnout nižšího rozlišení (obvykle bývá uváděno asi max. $0,1^\circ$ celkové hodnoty) a typy s rezistivním filmem s teoreticky neomezeným rozlišením. Kromě běžných potenciometrů s měřeným rozsahem pohybu kolem 300° existují též speciální vysoce lineární potenciometry pro měřicí účely s rozsahem až 359° , které navíc mohou umožňovat kontinuální provoz (ovšem s onou šestistupňovou mezerou se daná aplikace musí být schopna vypořádat). Dále také existují víceotáčkové potenciometry.

Jak již bylo zmíněno, principiální výhodou potenciometrů je jejich velmi nízká cena, dále pak jednoduchost přístupu k naměřeným datům, neboť napětí patří k nejčastěji měřeným veličinám. Tento fakt však paradoxně přestává díky digitalizaci i nejjednodušších zařízení postupně platit a analogově-digitální převod může představovat mnohdy větší komplikaci než např. čistě digitální připojení inkrementálních enkodérů. Mezi nevýhody potenciometrů pak patří zejména poměrně značná nelinearita a tedy i celkově nízká přesnost u běžných typů (či naopak vysoká cena u speciálních, vysoce lineárních typů) a zejména poměrně nízká spolehlivost způsobená mechanickým pohyblivým kontaktem. Značnou nevýhodou je to, že ušpiněná mechanika potenciometru nemá za vliv pouze snížení přesnosti měření, ale může způsobit i naprosté selhání měření. V některých aplikacích může být značnou nevýhodou také nezanedbatelné silové zatížení měřené osy vlivem tření uvnitř potenciometru a dále možný vznik elektrického rušení (vedení potenciometru představuje anténu).

7.3.2 Optické enkodéry

První optické enkodéry byly vyvinuty ve čtyřicátých letech 20. století a použity v elektronickém hudebním nástroji pro simulaci stylu hry na jiné nástroje.

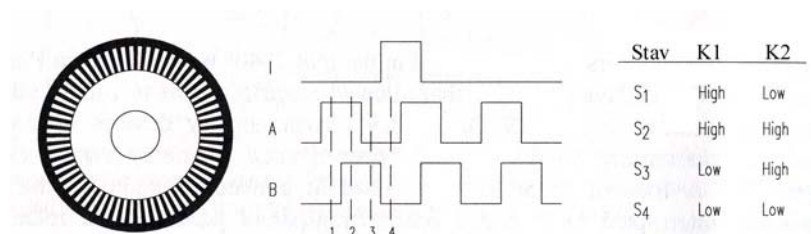
Dnešní typický optický enkodér je představován téměř uzavřeným miniaturním válečkem, uvnitř kterého se nachází precizně mechanicky provedená miniaturní optická závora (či závory) jejíž světelný paprsek je při rotaci osy přerušován rotujícím diskem s miniaturními otvory. Rotující disk bývá zpravidla vyroben z pochromovaného skla, leptaného kovu, nebo speciálního fotoplastu.

Obecně lze enkodéry rozdělit na absolutní a relativní. Zatímco relativní enkodér měří prakticky pouze rotační rychlost a může tedy poskytnout jen relativní (vztažnou) informaci o pozici, výstupem absolutního enkodéru je přímo absolutní natočení měřené osy. Obecně lze říci, že relativní enkodéry jsou při srovnatelném rozlišení mnohem levnější a obvykle i dostupnější, rovněž vyhodnocení poskytovaných informací (a tedy i příslušný interface) je jednodušší. Vzhledem k těmto faktům bývají často v praxi relativní enkodéry používány i u úloh, které vyžadují absolutní měření rotační polohy s tím, že je na začátku činnosti systému provedena inicializace s pomocí indexového kanálu nebo nějakého mechanického kontaktu sloužícího jako vztažný bod. Praktické řešení bývá také kombinací těchto postupů – referenční spínač není zpravidla možno vyrobit mechanicky dostatečně přesně, vztažný bod tudíž bývá definován jako místo prvního index-pulsu po sepnutí spínače (to pochopitelně platí pro případ, kdy je inkrementální enkodér přímo na ose motoru a ne až za převodovkou, protože zde by pochopitelně stačil pouze index-puls).

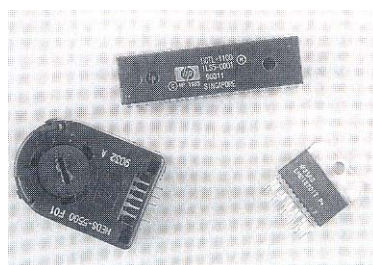
7.3.2.1 Inkrementální optické enkodéry

Nejjednodušším typem inkrementálního enkodéru je tzv. tachometrový enkodér nebo též enkodér s jedním kanálem. Jde o senzor, který produkuje určitý počet impulsů obdélníkového nebo sinusového průběhu na plné otočení osy senzoru. Čím je vyšší počet impulsů na otáčku,

tím je vyšší rozlišení, ale bohužel i cena. Tyto levné senzory se velmi dobře hodí jako zpětnovazební rychlostní senzory v systémech, které se pohybují středními až vysokými rychlostmi, kvůli kvantizačním chybám však nejsou příliš vhodné pro systémy s extrémně nízkou rychlostí pohybu. Typické maximální rozlišení pro enkodér o průměru cca 5cm se uvádí jako 2540 pulsů na otáčku. Další nezanedbatelnou nevýhodou jednokanálových enkodérů je nemožnost určení směru pomocí těchto senzorů. Tyto senzory tedy nelze používat pro určování polohy – je možno měřit pouze rychlost. Problém rozpoznávání směru pohybu řeší tzv. dvoukanálové inkrementální enkodéry (phase-quadrature incremental encoders) pomocí umístění dvou optických závor tak, aby měly naměřené signály fázi posunutou o 90° (viz. Obr.). Díky této technice je možno v dekódovací elektronice určit který signál se zpožďuje za kterým, což vede k určení směru. Výhodou tohoto přístupu je také to, že je možno dosáhnout až čtyřnásobného zvýšení rozlišení při stelném počtu otvorů na disku. Inkrementální princip snímání u těchto senzorů způsobuje, že i u dvoukanálových enkodérů je pozici možno měřit pouze vzhledem k nějakému vztažnému bodu. Je tedy nutné určit a „zapamatovat si“ nějakou vztažnou pozici a počítat impulsy na jednu či druhou stranu a tím udržovat neustálou informaci o poloze. Pro určení vztažného bodu bývají enkodéry často vybaveny ještě třetím kanálem, zvaným jako indexový výstup nebo též indexový puls. Jde o kanál, který má pouze jediný otvor na povrchu disku a vygeneruje tedy impuls pouze jednou za celou otáčku. Pozice je tedy počítána z „kladných“ a „záporných“ inkrementů od tohoto vztažného impulsu. Nevýhodou tohoto přístupu je to, že pozice je ztracena při každém vypnutí zařízení (pokud neexistuje přesně definovaná aretační poloha). Při zapnutí takových zařízení je tedy nutno zpravidla provést inicializační sekvenci, kdy je vyhledán index-puls nebo koncový či referenční spínač. Vzhledem k obrovskému rozšíření tříkanálových inkrementálních enkodérů je možno sehnat též specializované součástky pro práci s nimi. Existují tedy například jednočipové PID kontroléry se vstupy od inkrementálního čidla a výstupem přímo pro H-můstek. Několik výrobců již nabízí komplety motorů s integrovanými miniaturními inkrementálními enkodéry (např. Maxon, Faulhaber, ...).



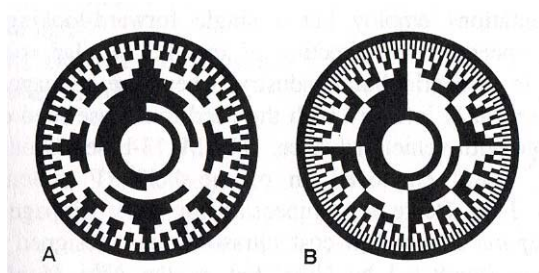
Obr. 7.1 Tříkanálový inkrementální enkodér; I - indexový kanál, A a B – kanály se vzájemně posunutou fází



Obr. Inkrementální enkodér Hewlett Packard, PID regulátor Hewlett Packard a H-můstek National Semiconductors

7.3.2.2 Absolutní optické enkodéry

Absolutní enkodéry jsou typicky používány v aplikacích s pomalejšími procesy, kde nemůže být tolerována ztráta informace o pozici v případě výpadku napájení.



Obr. 7.2 Ukázka kódování pozice u absolutních optických enkodérů: A) Grayův kód, B) binární kód

Optické závory jsou v tomto případě uspořádány do řady, takže je možno přečíst stav všech bitů zakódované pozice najednou. Vzhledem k vyššímu počtu datových kružnic se ovšem zvětšuje i velikost disku, čímž mimo jiné klesá i odolnost senzoru vůči nárazu a vibracím. Obecně bývá uváděno pravidlo, že přidání jednoho bitu do paralelního kódu sice zvýší rozlišení na dvojnásobek, ale zvýší cenu přibližně čtyřnásobně.

Výstup ze senzoru je pochopitelně také paralelní, což zvyšuje komplikovanost vstupního interface.

Dva nejčastěji používané typy kódování informace o poloze na discích absolutních optických enkodérů jsou na Obr. Část B ukazuje tzv. binární kód, kde je narůstající řada přirozených čísel zobrazena v binární podobě. Zásadní nevýhodou tohoto řešení je, že zde není ošetřen počet měnících se bitů v jednom kroku. Představíme-li si přechod z hodnoty 255 na hodnotu 0 u osmibitového enkodéru, pak dochází v jednom kroku ke změně osmi bitů (z logické 1 na 0). Jestliže si však uvědomíme, že snímání optočleny probíhá kontinuálně a zajisté se nepodaří je všechny uspořádat přesně do roviny (o nepřesnostech na disku nemluvě), pak určitě nastanou okamžiky, kdy budou některé bity již v logické nule, zatímco jiné ještě v logické jedničce. Výstupem senzoru v takovém případě může být libovolné číslo. I přesto, že je stav senzoru snímán jen v časově diskretních okamžicích, není možno vzhledem k nepředvídatelné rychlosti pohybu zajistit odfiltrování popsání jevu. Řešením (přesněji řečeno podstatným omezením) problému je použití tzv. Grayova kódu – viz. Obr. Grayův kód je charakterizován tím, že při přechodu mezi dvěma následnými pozicemi se změní vždy jen jeden bit.

Jak již bylo řečeno, absolutní enkodéry je vhodnější používat pro pomalejší děje – tedy obecně spíše pro snímání úhlu natočení než pro kontinuální provoz. Dále je nutno zvážit menší odolnost vůči otřesům a nárazům a menší teplotní rozsah. Rovněž rozlišení absolutních enkodérů bývá nižší (typicky do 1000 pulsů na otáčku) a připojení k řídicímu systému potřebuje více vodičů. Cena absolutních enkodérů je jednoznačně vyšší oproti enkodérům relativním. Hlavní výhodou těchto senzorů je pak jejich schopnost udat aktuální pozici i po výpadku napájení.

8 Automatická navigace mobilních robotů

Automatická navigace mobilního robotu je první krok při tvorbě jeho umělé inteligence. Je nutno si uvědomit, že pouze v případě, že robot zná svou pozici, může provádět další úkony

jako jsou tvorba map (pokud není spřažena se sebelokalizací), plánování trajektorie a plánování misí.

V historii robotiky bylo vyvinuto velké množství metod vhodných pro automatickou sebelokalizaci mobilních strojů a není jednoduché provést účelné rozdělení těchto metod do skupin.

Patrně nejobecnější rozdělení může být provedeno podle toho, jestli metoda potřebuje pro svou činnost nějaké externí zařízení nebo jestli jsou veškeré součásti potřebné pro navigaci umístěny na robotu samotném (tzv. soběstačné systémy). Je ovšem nutno si uvědomit, že externí zařízení nemusí být pouze aktivní jednotky, ale také pasivní objekty (tzv. landmarky) představující úpravu prostředí pro zjednodušení práce sebelokalizačního algoritmu. Je možno jednoznačně říci, že soběstačné systémy jsou zpravidla flexibilnější, ale obvykle mnohem komplikovanější. Soběstačné systémy navíc prakticky výlučně trpí postupnou integrací chyb, kterou lze u systémů s externími objekty zcela eliminovat.

Zde budou jednotlivé navigační systémy rozděleny podle principu měření pozice.

8.1 Dead reckoning

(pojem pochází z anglického „deduced reckoning“ a pravděpodobně nemá vhodný český ekvivalent)

Metoda která bývá definována jako „matematická procedura pro určování současné pozice vozidla pomocí postupného přičítání díky známému kurzu a rychlosti v průběhu času [1]“.

Nejjednodušší implementace této metody ve známá jako odometrie. Tato bývá obvykle provedena pomocí inkrementálních čidel (v současnosti jsou nejčastěji užívány optické inkrementální enkodéry) přímo připojených k osám motorů. Další možností je připojit magnetosenzor ve funkci kompasu nebo gyroskop. Poto jde o takzvanou gyroodometrii.

Je důležité si uvědomit, že ne všechny typy podvozků jsou vhodné pro použití odometrie. Jako velmi vhodný se jeví v robotice asi nejpopulárnější a nejčastěji používaný diferenciální podvozek (dva nezávisle řízené motory přes převodovku přímo spojené s koly a dvě pasivní všesměrová kola či opěrné body).

Často bývá také používán Ackerman steering (případně v robotice oblíbenější trojkolka), kde je posun měřen inkrementálními enkodéry a natočení může být měřeno buď relativně např. pomocí potenciometru či absolutně pomocí magnetosenzoru nebo gyroskopu.

Dalším vhodným podvozkem je tzv. synchro-drive, kde je možno dosáhnout velmi malého prokluzování kol díky tomu, že vektory sil od jednotlivých kol se shodují ve směru i velikosti.

Nejčastěji používané senzory pro dead reckoning jsou: tachodynamy, potenciometry, optické, magnetické, induktivní a kapacitní enkodéry, magnetometry a gyroskopy. Potenciometry se nedoporučují pro aplikace, kde je potřeba vyšší přesnost a spolehlivost – zde se naopak velmi dobře uplatní absolutní či relativní enkodéry. V současné době je na trhu několik firem nabízejících motory s přímo integrovanými enkodéry (napr. Maxon).

Při použití metody dead reckoning je třeba mít na paměti způsob její činnosti a z něj vyplývající výhody a omezení. Implementace je zpravidla velmi levná, měření rychlosti

pomocí inkrementálních enkodérů může být i při nízké ceně velmi přesné. Problémem je však neustále narůstající chyba, kterou není možno eliminovat; je také třeba zvážit možnost prokluzu či deformace kol podvozku, které mohou způsobit značné chyby.

8.2 Sledování vodící čáry (guidepath following)

Jde o jednu z nejjednodušších metod pro navigaci mobilních robotů. Princip činnosti lze obecně popsat tak, že robot reaguje na snímanou pozici nějaké externí trasy. Je zřejmé, že metoda má hned dvě značná omezení: je nutná modifikace prostředí (tj. instalace vodících čar) a není možná navigace na libovolné místo – robot pochopitelně může být navigován pouze tam, kde se nachází vodící čáry. I přes tato zásadní omezení jde o metodu, která byla a je patrně nejvíce používána v mnoha aplikacích (zejm. průmysl, sklady a nemocnice) a to pro svou implementační jednoduchost, nízkou cenu a značnou spolehlivost. Je nutno si uvědomit, že i přes svou relativně značnou jednoduchost poskytuje tento způsob navigace mnohem větší volnost pohybu, implementační flexibilitu a nižší cenu než dříve používané předprogramované pohyby (hard automation). Při užití této metody je možno použít prakticky neomezené množství strojů pracujících současně bez nebezpečí vzájemného rušení.

Dnes nejčastěji používané metody sledování vodící čáry zahrnují zpravidla nějaký typ pevně nainstalovaného vodícího drátu nebo pruhu a specializované senzory instalované v přední části stroje. Nejčastěji používané jsou pak systémy s optickým a magnetickým naváděním.

Optické vodící čáry jsou velmi jednoduché na instalaci a je jednoduché je změnit. Díky tomu, že vodící čáry jsou v tomto případě pasivní, není limitována délka vodících čar. Na rozdíl od systémů s naváděním pomocí vodičů také nevadí malá přerušení vodící čáry (u vodiče by byl pochopitelně přerušen elektrický obvod). Hlavní nevýhodou těchto systémů je to, že optický navaděč může je zpravidla nekrytý a obvykle navíc vyčnívá nad povrch a může tedy být snadno poškozen, ušpiněn nebo zakryt.

Druhým nejpoužívanějším principem je navádění, kdy je použita magnetická páska připevněná nebo zapuštěná do podlahy. Magnetické pole je pak snímáno maticí magnetometrů či halových sond umístěných zpravidla opět v přední části robotu. Výhody tohoto způsobu jsou nenáročnost na údržbu, značná odolnost, imunita vůči přerušením a neomezená délka naváděcích čar. Magnetických čar je mimochodem také možno s výhodou použít pro vytvoření mřížek a doplnění odometrie. Kombinací obou metod dojde k podstatnému omezení chyby, která již nemá integrační charakter.

Jak je patrné z předchozího textu, navigace na vodící čáru může představovat podstatný pokrok v průmyslu, ve skladech apod., pro autonomní mobilní robotiku však představuje nemožnost navigace na předem neprozkoumané či přesněji neoznačené oblasti podstatné omezení způsobující zpravidla praktickou neužitečnost metody.

8.3 Inerciální navigace

Metoda zvaná inerciální navigace (inertial navigation) používá tzv. inerciálních senzorů, jako jsou gyroskopy a akcelerometry pro měření rychlosti pohybu vozidla a následně pozice,

přičemž primární měřenou veličinou je zpravidla zrychlení. Celý princip tedy spočívá ve faktu, že známe-li startovní pozici objektu a zaznamenáme-li změny zrychlení ve všech osách, které jsou pro měření podstatné, jsme schopni vypočítat současnou rychlost a pozici. Tato technologie byla patentována roku 1910 v Německu a byla poprvé použita ve druhé světové válce v bojových raketách V-1 a V-2.

Ačkoli princip metody je velmi jednoduchý (ze zrychlení se první integrací získá rychlost a další integrací pozice), praktická realizace je velmi obtížná a zejména nákladná, protože s integrací užitečného signálu je pochopitelně integrována i chyba. Proto byla technologie inerciální navigace neustále vylepšována v průběhu minulých desetiletí a nyní je již široce používána zejména v letadlech, lodích, tancích, ponorkách, raketách s střelách, tedy v oblastech, kde výhoda přesného určení polohy zcela nezávisle na jakýchkoli vnějších systémech předčí nevýhodu vysoké ceny.

Existují dva základní implementační přístupy při tvorbě inerciálních navigačních systémů. První z nich používá gyroskopicky stabilizovanou platformu pro vyvážení senzorů s předdefinovaným referenčním rámem a nazývá se kardanový inerciální navigační systém (gimballed inertial navigation system). Druhý přístup používá plošinu pevně spojenou s vozidlem a nazývá se bezkardanový inerciální navigační systém (strap-down inertial navigation system).

Kardanové navigační systémy mají dvě zásadní výhody: na inerciální senzory působí menší úhlové síly a je jednodušší výpočet aktuální pozice. Hlavní výhody bezkardanových systémů jsou pak menší rozměry, nižší spotřeba energie a jednodušší mechanická konstrukce z níž vyplývá obvykle nižší cena.

Inovace v technologiích čítající levné inerciální senzory, GPS technologie a levné výkonné výpočetní prostředky v posledních letech způsobují (a nepochybně budou i nadále způsobovat) znatelný příklon k implementaci bezkardanových inerciálních navigačních systémů.

Senzory používané v inerciálních navigačních systémech je možno rozdělit na dvě základní skupiny: snímače otočení (rotation, heading) a snímače posunutí, tedy akcelerometry.

8.3.1 Inerciální snímače otočení

Tyto snímače mohou být rozděleny opět na dvě základní skupiny podle primárně snímané veličiny - tedy na gyroskopy snímající primárně úhlovou rychlost a na kompasy snímající primárně úhlovou polohu. Hlavní nevýhoda gyroskopů je, že pro dosažení úhlové polohy je nutno jejich výstup integrovat, čímž je integrována i jejich chyba. Znamená to tedy, že vzhledem k tomu, že každý senzor poskytuje kromě užitečného signálu i šumovou složku, bude celková chyba signálu gyroskopu v čase neustále narůstat. Jinak řečeno nepohybující se gyroskop bude udávat narůstající či klesající výchylku. Tato chyba bývá často označována jako teplotní drift (temperature drift). Dalším zdroj chyb u gyroskopů vyplývá z jejich omezeného dynamického rozsahu. Jelikož má každý senzor pouze limitovanou frekvenční odezvu a není tedy schopen zachytit pohyby rychlejší než určitá hranice, způsobí rychlé pohyby (mezi než patří např. i vibrace) velké chyby v měření. Velkou výhodou gyroskopů je praktická nemožnost rušení jejich primárně snímané veličiny. Výhody a nevýhody magnetometrů (či magnetických kompasů) jsou opačné. Snímanou veličinou je

geomagnetické pole, které bývá velmi často rušeno mnoha projevy lidské činnosti (elektřina, rádiový přenos, elektromotory) a magneticky aktivními objekty (zářiče a absorbéry).

8.3.2 Mechanické gyroskopy

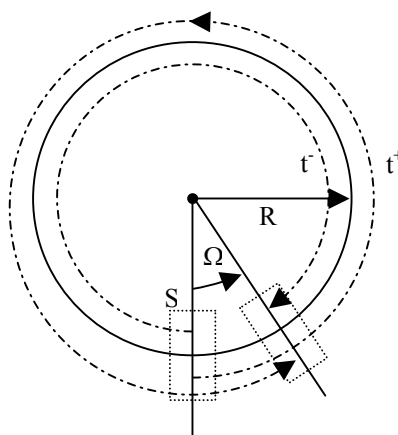
Mechanické gyroskopy mohou být rozděleny na senzory snímající jeden stupeň volnosti (single-degree-of-freedom gyroscopes - SDFG), často též zvané jednoosé a senzory snímající dva stupně volnosti (two axis, free gyros, 2DFG), tedy dvojosé nebo volné gyroskopy. SDFG senzory se dále dělí na typy s otevřenou a uzavřenou smyčkou.

Vzhledem k tomu, že pro komplexní inerciální navigační systém jsou nezbytné tři údaje o otočení a tři údaje o poloze, je nutno použít buď tři SDFG nebo dva 2DFG. Častěji jsou používány dva 2DFG senzory, protože toto řešení je menší a je možné senzory prostorově uspořádat takovým způsobem, že i při poruše jedné osy jednoho gyroskopu mohou být stále měřeny všechny tři údaje o natočení.

Posledním často používaným principem je tzv. vibrační gyroskop, jehož funkce je založena na měření Coriolisova zrychlení. První gyroskopy s tímto principem byly zkonstruovány v šedesátých letech 20. století, ale pro svá omezení se nerozšířily. V poslední době se však tento (vylepšený) princip měření stává stále populárnějším, zejména v souvislosti s mikroelektromechanickými součástkami (micor electromechanical systems - MEMS).

8.3.3 Optické gyroskopy

Na rozdíl od mechanických gyroskopů jejichž činnost je založena na Newtonově pohybovém zákonu, optické gyroskopy využívají tzv. Sagnacův efekt. Sagnacův efekt může být popsán pomocí obrázku 1. Dva světelné paprsky cestují opačným směrem světelným vláknem ohnutým do tvaru kružnice. Bod startu pohybu paprsků je označen S, poloměr kružnice je R. Jestliže se zdroj světla pohybuje úhlovou rychlostí Ω , potom světlo cestující ve směru opačném ke směru pohybu zdroje se vrátí do S dříve než paprsek cestující opačným směrem. Světelný paprsek cestující ve směru pohybu světelného zdroje S proletí vzdálenost L^+ v čase t^+ , zatímco paprsek cestující v opačném směru urazí vzdálenost L^- v čase t^- . Tento jev popisuje rovnice (1).



Obrázek 8.1. Sagnacův efekt

$$L^- = 2\pi R - R\Omega t^-$$

$$L^+ = 2\pi R - R\Omega t^+ \quad (1)$$

jestliže proletí paprsek vláknem N-krát je rozdíl v tranzitních časech vyjádřen následující rovnicí:

$$\Delta t = (4NA/c^2)\Omega \quad (2)$$

a vzdálenost reprezentovaná tímto tranzitním časem je

$$\Delta L = c\Delta t = 4AN\Omega/c = (Ld/c)\Omega \quad (3)$$

kde

A	plocha opsaná vláknem
d	průměr kružnice
L	celková uražená dráha

Pro světelný paprsek o frekvenci f (vlnová délka $\lambda = c/f$), perioda $T=1/f$ je čas potřebný pro změnu fáze 2π , takže změna Sagnacovy fáze ϕ za čas Δt je

$$\phi = 2\pi f\Delta t = (8\pi AN/\lambda c)\Omega \quad (4)$$



Obr 8.2 Laserový gyroskop

Optické gyroskopy mohou být rozděleny podle několika kritérií. První rozdělení může být na aktivní a pasivní gyroskopy. V pasivních gyroskopech je Sagnacova fáze měřena externě, zatímco v aktivních senzorech způsobuje Sagnacova fáze přímo změnu frekvence, tj. výstupem je přímo signál úměrný rotaci. Optické gyroskopy mohou být také rozděleny na gyroskopy s rezonancí a bez ní. Gyroskopy bez rezonance (single beam, non-resonanting) používají záření o stejné frekvenci pro oba směry a světlo opíše svou dráhu v optickém vlákně pouze jednou – pak je rekombinováno s původním signálem a je změřena interference. V tomto typu senzorů jsou obvykle používány Sagnacovy či Mach-Zehnderovy interferometry. Rezonanční gyroskopy naopak pracují s různými frekvencemi signálů vysílanými opačným směrem do optického vlákna. Kontinuální interference v rezonátoru má v tomto případě mnohem lepší frekvenční průběh průběh než v případě senzorů bez rezonance.

Optické gyroskopy mají oproti mechanickým gyroskopům zcela rozdílné charakteristiky. V mechanických gyroskopech jsou hlavním zdrojem chyb různé druhy tření a dále šum vznikající při převodu mechanických veličin na elektrické. Naprotitomu u optických

gyroskopů je hlavním principiálním zdrojem šumu kvantový efekt. Zatímco krátkodobé parametry obou přístupů mohou být přibližně stejné, hlavní výhodou optických gyroskopů oproti mechanickým je jejich dlouhodobá stabilita.

8.3.4 Akcelerometry

Akcelerometr je senzor, který využívá setrvačnost hmoty pro měření rozdílu mezi kinematickým zrychlením vzhledem k nějakému inerciálnímu prostoru a gravitačním zrychlením.

Trendy v oblasti vývoje akcelerometrů jsou velmi podobné trendům v oblasti vývoje gyroskopů. Klasické mechanické senzory jsou v dnešní době postupně nahrazovány součástkami vyrobenými MEMS technologií, které mají mnohem menší rozměry, nižší energetickou spotřebu a podstatně nižší cenu. Nevýhodou těchto součástek je zatím stále nedostatečná přesnost pro mnohé aplikace. Nejčastěji používanou metodou je totiž kapacitní měření pohybu mechanického elementu. Jako výhodnější se v tomto ohledu jeví použití piezoelektrického jevu, kterým však zase není možno změřit stejnosměrnou složku signálu (senzor tedy nemůže být použit jako inklinometr). Jako vhodná metoda se tedy jeví kombinace piezoelektrického jevu pro vyšší frekvence a kapacitního principu pro stejnosměrnou složku a velmi nízké frekvence.



Obr 8.2 Vývojová deska pro akcelerometr ADXL202 firmy Analog Devices

8.3.5 GPS

GPS (Global Position System) je celosvětový radionavigační satelitní systém s kontinuálním pokrytím poskytovaný vládou Spojených států libovolnému uživateli za cenu přijímače. Systém pracuje 24 hodin denně za každého počasí. Jako jediný satelitní navigační systém poskytuje permanentní celosvětovou dostupnost s prostorově uniformní přesností a vysokou spolehlivostí.

Poskytování GPS bylo původně poskytováno selektivně ve dvou stupních: SPS (standard-positioning service) s úmyslným znehodnocením signálu označeným jako selektivní dosažitelnost (SA – selective availability) pro obecné uživatele a PPS (precise-positioning service), který byl přístupný pouze uživatelům autorizovaným vládou Spojených států. V

květnu 2000 bylo však toto rozdělení výnosem prezidenta U.S.A. zrušeno [2], přesnější měření polohy je tedy přístupné všem uživatelům GPS.

Systém NAVSTAR (**N**avigation **S**atellite **T**iming and **R**anging – oficiální název amerického ministerstva obrany) sestává ze tří segmentů:

- Satelitní či vesmírný segment (space segment)
- Kontrolní a řídicí segment (control segment)
- Uživatelský segment (user segment)

8.3.5.1 Satelitní segment

Jádro celého navigačního systému sestává minimálně ze 24 satelitů, z nichž je 21 aktivních a tři záložní. Satelity jsou umístěny na tzv. vysoké orbitě ve výšce přibližně 20 000 km nad povrchem Země. Tato výška umožní pokrytí velké plochy signálem z jednoho satelitu. Satelity putují po svých drahách tak, aby byly z každého místa na zemské kouli viditelné vždy alespoň čtyři satelity (rozumí se pochopitelně viditelnost a ideálních podmínek). Satelity nejsou geostacionární – pohybují se rychlostí asi 12 000 km/h, která jim umožní oběhnout Zemi jednou za 12 hodin. Satelity jsou napájeny solárními bateriemi, při jejich selhání (či nečinnosti – satelity pochopitelně cestují i ve stínu Země) jsou napájeny ze záložních akumulátorů. Satelity mají i malé vyrovnávací raketové motory pro dorovnávací změny kurzu.

První satelity byly na oběžnou dráhu vypuštěny v roce 1978, plný stav 24 satelitů byl dosažen až roku 1994.

Signál je vyslán na několika frekvencích, z nichž hlavní jsou označovány jako L1 a L2. Běžné komerční přístroje jsou naladěny na frekvenci označovanou jako L1 s hodnotou 1575,42MHz. Vysílací výkon jednoho satelitu je pouze asi 20-50W.

Každý satelit vysílá unikátní kód, čímž je možno od sebe signály pocházející z různých satelitů odlišit. Celým principem je umožnit rozpoznání signálů od jednotlivých satelitů a z jejich vzájemných časových posunů určit vzdálenost těchto satelitů od přijímače (známe-li dobu letu signálu a rychlost šíření signálu v daném prostředí, spočteme vzdálenost zdroje od přijímače). Jelikož je pozice satelitů v libovolném časovém okamžiku známá, je možno spočíst i pozici přijímače. GPS signál navíc obsahuje informaci o pozicích jednotlivých satelitů, informaci o čase, zprávu o celkovém stavu systému a ionosférický model šíření signálu.

8.3.5.2 Kontrolní segment

Jde o síť pěti řídicích a kontrolních stanic rozmístěných po světě, z čehož jsou čtyři stanice automatické (bez obsluhy) a jedna hlavní řídicí stanice s lidskou obsluhou.

8.3.5.3 Uživatelský segment

Tento segment sestává z uživatele a GPS přijímače. GPS je nejčastěji používán armádou, záchrannými týmy, piloty letadel, výzkumnými organizacemi, ale stále častěji též turisty, sportovci a nadšenci. Prakticky všechny moderní přijímače GPS jsou tzv. dvanáctikanálové, to znamená že umožňují současný příjem signálu až ze dvanácti satelitů, což je současně maximální počet současně viditelných satelitů z jednoho místa.

8.3.6 Diferenciální GPS

V aplikacích, kde je vyžadována vyšší přesnost než poskytuje standardní GPS je možno použít některou z metod diferenciální GPS (DGPS). V takovýchto případech je však nutno počítat s mnohem vyšší cenou navigačního systému. Princip DGPS je takový, že chyby je možno eliminovat pomocí stacionárního přijímače a šíření naměřených hodnot k ostatním přijímačům. Běžně jsou používány tři metody. První z nich (position-space DGPS) funguje na principu pouhého odečítání hodnot naměřených oběma GPS přístroji. Její nevýhodou je, že dává uspokojivé výsledky pouze v případě, že obě měření používají pro výpočet polohy shodné satelity. K obvyklému omezení všech DGPS – v celosvětovém měřítku lokální použití (tj. řádově stovky kilometrů) se tím přidává ještě podstatně větší omezení plynoucí z nutnosti zajistit stejnou viditelnost oblohy a tedy i satelitů pro oba přijímače. Vzhledem k tomu, že použitý signál má velmi malou prostupnost prakticky jakýmikoli jinými materiály než vzduchem, jde o omezení podstatné. I přesto je tuto metodu možno s výhodou používat v některých aplikacích – např. na vodní hladině apod. Další dvě metody jsou zpravidla označovány jako single differencing a double differencing. Jejich rozlišení je přibližně shodné, ale každá z nich je vhodná pro použití za různých okolností. Existují dokonce i techniky umožňující vzájemné dopřesňování údajů ze dvou vzájemně se pohybujících se GPS přijímačů.

Rozlišení běžného přijímače GPS bez filtrace a bez SA je zpravidla uváděno 22 metrů. Position-space DGPS obvykle poskytuje přesnost kolem 1-2m. Pomocí metod single a double differencing DGPS je možno dosáhnout rozlišení až 2,77mm. Přesnost všech těchto metod je navíc možno zvýšit pomocí dynamické filtrace (Kalmanův filtr, apod.).



Obr. 8.3 Ukázky komerčního (vpravo) a aplikačního (vlevo) přijímače GPS firmy Garmin

Hlavní principiální nevýhodou všech systémů GPS (tedy i DGPS) je špatné šíření signálu ze satelitů nesoucího informaci o pozici. Obvykle bývá uváděno, že je nutná přímá viditelnost na

satelity. Praxe ukazuje, že je možno signál zachytit např. i v lese či pod slabou dřevěnou střechou. Nízká dosažitelnost signálu však každopádně znamená značné omezení při použití v mobilní robotice, protože je zde častý požadavek činnosti uvnitř budov.

Inerciální navigace a GPS mají do značné míry komplementární charakteristiky takže je obvyklé použití fúze dat (zpravidla pomocí Kalmanova filtru) z obou systémů.

8.4 Navigace pomocí taktilních a proximálních senzorů

Taktilní senzory jsou používány na mobilních robotech pro poskytování informací o kolizích s překážkami, což implikuje přímý fyzický kontakt mezi senzorem a překážkou. Na druhé straně proximální senzory jsou bezkontaktní zařízení, která poskytují varování o přítomnosti objektu bez nutnosti interakce objektu a senzoru.

V mobilní robotice jsou nejčastěji používány tři skupiny taktilních senzorů: taktilní antény, taktilní nárazníky a pole spínačů.

Proximální senzory je také možno rozdělit do několika základních skupin, z nichž nejčastěji používané jsou magnetické, indukční, kapacitní, ultrazvukové, mikrovlnné a optické. Každý ze jmenovaných typů senzorů má jinou oblast použití, která je daná rozlišením, dosahem, frekvencí snímání, ale i cenou a schopností pracovat v náročných podmínkách, apod.



Obr. 8.4 Jednoduchý mobilní robot s taktilními senzory

Proximální a zejména taktilní senzory jsou zpravidla používány jako doplněk k dalším sebelokalizačním systémům. Výjimku tvoří zejména ultrazvukové a optické proximální senzory, které jsou často samostatně používány pro sebelokalizaci strojů uvnitř budov.

Optické a ultrazvukové dálkoměry mohou být rozděleny na dvě základní skupiny, a to jednodušší triangulační systémy a komplexnější systémy s interní reprezentací prostoru či systémy s vnitřní mapou.

Triangulační principy se dále dělí na metody pracující s jedním vysílačem umístěným na stroji a několika přijímači pevně umístěnými v prostředí a na metody pracující s přijímačem umístěným na robotu a několika vysílači sloužícími jako majáky. Prvně jmenovaný princip funguje lépe v případech, kdy se v inkriminovaném prostoru pohybuje pouze jeden nebo malý počet robotů, zatímco výkonnost druhé metody prakticky nezávisí na počtu robotů. Vzhledem k tomu, že je obvykle nutná přímá viditelnost mezi vysílači a přijímači a přesnost metody je závislá na prostorovém rozložení majáků, je nutno pečlivě zvážit jejich umístění. Ačkoli jsou triangulační metody relativně levné a jednoduché, představuje nutná změna prostředí (tj. instalace vysílačů či přijímačů) značné omezení pro mnohé aplikace.

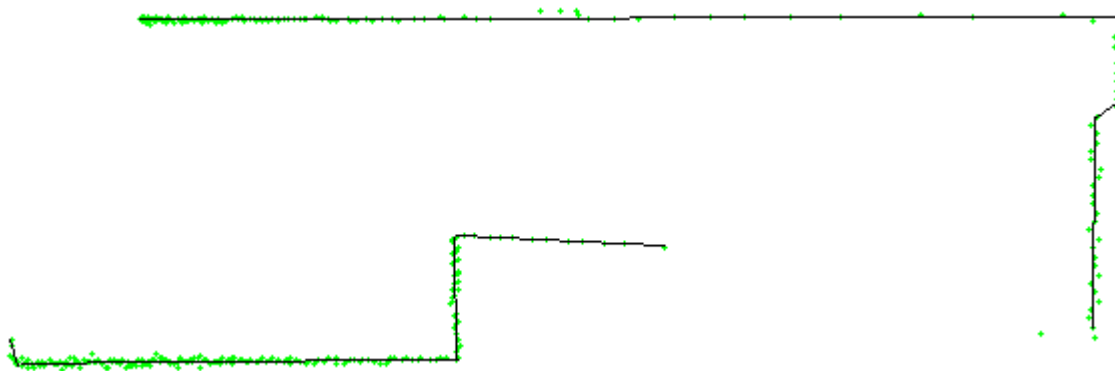
Systémy s interní reprezentací prostředí jsou obvykle dražší a mnohem sofistikovanější, ale (alespoň v případě systémů bez umělých značek) nepotřebují modifikace v prostředí, protože

všechny součásti navigačního systému jsou obsaženy na samotném robotu. Systémy s interní reprezentací prostoru mohou být rozděleny na tři základní skupiny: systémy s vyhledáváním umělých značek (artificial landmarks), systémy s vyhledáváním přirozených význačných oblastí (natural landmarks) a systémy se skutečnou mapou prostředí. Je ovšem nutno podotknout, že je poměrně obvyklá kombinace vyhledávání přirozených landmarků a mapy prostředí.

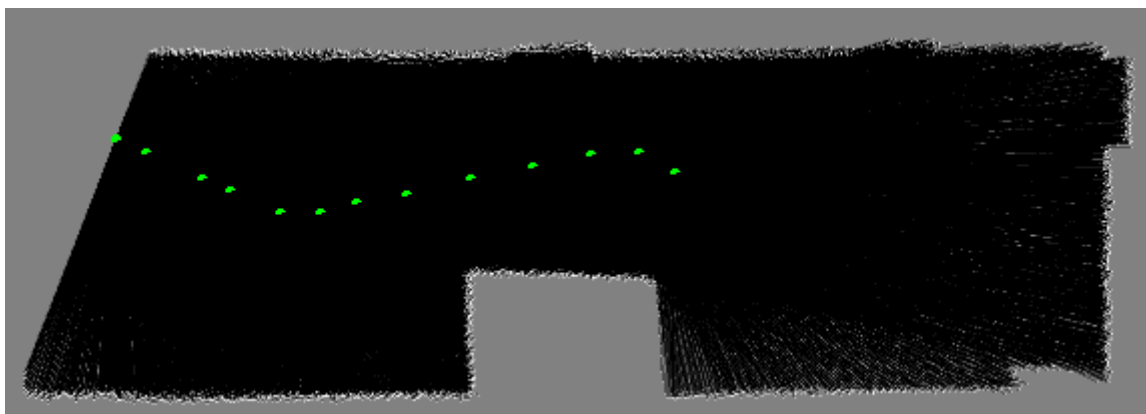


Obr. 8.5 Laserový proximitní skener SICK PLS 101

Ultrazvukové a optické senzory vzdálenosti mohou být rozděleny podle principu činnosti do následujících skupin: triangulační senzory, systémy měřící dobu letu signálu (time of flight), systémy s měřením fáze a radary s frekvenční modulací. Dále se tyto typy senzorů dělí podle jejich schopnosti bodového (zpravidla lasery), kónického (ultrazvuk – zpravidla přibližně 10°), či plošného nebo prostorového (rozmítané lasery) měření. Obecnou nevýhodou ultrazvukových senzorů je nízká rychlost šíření ultrazvukového signálu ve vzduchu.



Obr. 8.6 Ukázka jednoho měření proximitního laserového skeneru. Jde o typ, který měří v rozsahu 180° v jedné rovině. Zelené body představují naměřené údaje, černé úsečky pak již segmentovaná data.



Obr. 8.7 Mapa vytvořená algoritmem REG (Robot Evidence Grids) stejným proximitním senzorem s vyznačením pozic na kterých byla měření prováděna. Určování pozice robotu bylo prováděno ze stejných dat.

Použitá literatura:

- [1] G.D. Dunlap., H.H. Schufeldt: Dutton's Navigation and Piloting, Naval Institute Press, 1972
- [2] The White House Office of the Press Secretary: STATEMENT BY THE PRESIDENT REGARDING THE UNITED STATES' DECISION TO STOP DEGRADING GLOBAL POSITIONING SYSTEM ACCURACY, <http://www.navcen.uscg.gov/news/archive/2000/May/SA.htm>, 2000
- [3] Joseph L. Jones, Anita M. Flynn, Bruce A. Seiger: Mobile Robots, Inspiration to Implementation, A K Peters, Ltd., 1999, ISBN 1-56881-097-0
- [4] Gordon McComb: The Robot Builder's Bonanza, McGraw-Hill, 2001, ISBN 0-07-136296-70
- [5] H.R.Everett: Sensors for Mobile Robots – theory and application, A K Peters, Ltd. Massachusetts, 1995, ISBN 1-56881-048-2