



# Roboty do vonkajšieho prostredia

V článku sú uvedené základné požiadavky na mobilné robotické systémy určené na činnosť vo vonkajšom prostredí. Pozornosť sa venuje predovšetkým senzorovému a riadiacemu systému. Uvedené sú základné parametre mobilného robota, ktorý získal druhé miesto na súťaži mobilných robotov Robotour.

## Úvod

Mobilné roboty vytvárajú nové možnosti na automatizáciu prác, nahradenie ľudí pri nebezpečných činnostiach, pomoc pri prácach v rôznych odvetviach a pod. V bežnom použití sa už vyskytujú roboty, ktoré pomáhajú v domácnostiach (automatické vysávače, kosačky trávnikov), tiež ako „obsluhujúci personál“ v nemocniciach a pod. Možno však už vidieť aj mobilné roboty s komplexnejším správaním, napr. na súťažiach (súťaž DARPA Urban Challenge, podobná súťaž menších rozmerov Robotour, súťaž Eurobot) alebo pri plnení úloh v náročných fyzikálnych podmienkach, napr. na dne mora pri hľadaní nerastných surovín, v prieskume kráterov sopiek, čiže v prostrediach nebezpečných pre človeka.

Pri konštruovaní a programovaní mobilných robotov vzniká veľké množstvo úloh a problémov. Úlohy, ktoré sa pre človeka javia ako veľmi jednoduché, sa pri riešení technickými prostriedkami môžu ukázať ako veľmi náročné. Problémy súvisiace s návrhom robota či už ako celku alebo len riadiaceho systému možno rozdeliť do viacerých kategórií. Jedno zo základných delení je: roboty na použitie vo vnútorných priestoroch – indoor roboty a na použitie vo vonkajších priestoroch – outdoor roboty.

Indoor prostredie sa dá charakterizovať ako lepšie štruktúrované (miestnosti s kolmými stenami, dvere a pod., aj keď štruktúrovanosť „kazi“ nábytok, ľudí a pod.). Vo vnútorných priestoroch sú stabilné poveternostné podmienky, tým aj lepšia využiteľnosť rôznej škály prístrojov. Vonkajšie prostredie je náročnejšie – okrem klasických prekážok, ako sú chodiaci ľudia, príp. pohybujúce sa iné objekty, sa vo vonkajších prostrediach menia aj poveternostné vplyvy, svetelné podmienky, ktoré do značnej miery ovplyvňujú senzory robota. Prostredie, v ktorom má byť nasadený mobilný robot, predurčuje aj jeho vlastnosti – typ podvozku, senzory, vybavenie, zdroj energie, potrebné programové vybavenie, riadenie ([Brä06], [Eve95], [Hub05], [Hub05-2], [Stef06], [Kar05], [Kar07], [Kar07-2]). Podľa typu prostredia sa určujú spôsoby lokalizácie, navigácie a určovania cieľov. Vďaka zložitosti riešenia problémov umelej inteligencie v mobilných robotoch je dnes ešte prevažná väčšina robotov ovládaná diaľkovo pomocou operátora.

Pri outdoor mobilných robotoch alebo aj od indoor systémov sa očakáva viacero základných úloh – jednou z nich je presun robota z miesta A na miesto B, kde plní stanovené úlohy (napr. zber údajov, podanie liekov pacientovi, znefunkčenie bomby). Pri praktickom riešení sa však už táto úloha komplikuje – robot môže poznať v podstate len svoje východiskové miesto a musí identifikovať miesto určenia, kde má plniť úlohu. Úloha sa ďalej komplikuje tým, že v prostredí, kde má vyhľadať cieľ, môžu stať rôzne statické prekážky (stromy, schody, budo-

vy, nábytok a pod.), alebo sa „prekážky“ pohybujú (ľudia, vozidlá idúce z rôznych smerov vzhľadom na robota). Z tohto dôvodu treba vyriešiť rôzne úlohy – identifikácia objektov v prostredí (typ objektu, smer pohybu, rýchlosť pohybu), samotný pohyb v prostredí – problém navigácie a lokalizácie v prostredí vrátane určenia cieľa. Príklady prístupov k riešeniu úloh sú napr. v [Cue05], [Pro.Smi01], [Vor05], [Vor06], [Vit02].

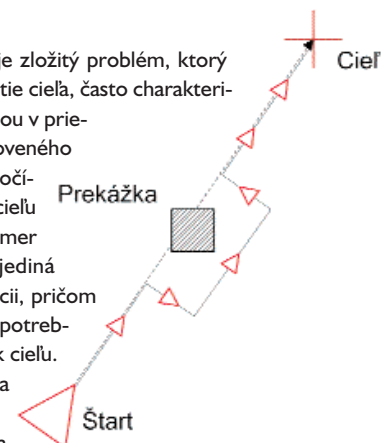
## Poloha v priestore

Určenie polohy v priestore je zložitý problém, ktorý je však potrebný na dosiahnutie cieľa, často charakterizovaného definovanou polohou v priestore. Na dosiahnutie stanoveného cieľa možno využiť prístup spočívajúci v stanovení smeru k cieľu v začiatočnej polohe. Tento smer k cieľu sa následne ako jediná informácia využíva pri navigácii, pričom pri prechode prostredím je potrebné udržiavanie tohto smeru k cieľu.

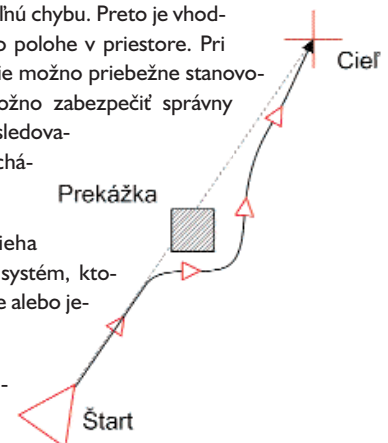
Ak sa vyskytne prekážka v prostredí, je potrebné jej obídenie a následný návrat na smerový vektor k cieľu (obr. 1). Pri dlhších vzdialenostiach môže aj malá odchýlka v sledovaní smeru k cieľu spôsobiť nezanedbatelnú chybu. Preto je vhodné doplniť navigáciu o údaj o polohe v priestore. Pri poznaní polohy počas navigácie možno priebežne stanovovať smer k cieľu. Takto možno zabezpečiť správny smer aj v prípade narušenia sledovaného smeru z dôvodu obchádzania prekážok (obr. 2).

Určovanie polohy prebieha vzhľadom na určitý vzťažný systém, ktorým môže byť celé prostredie alebo jeho časť.

Na stanovenie polohy v tomto vzťažnom systéme je potrebná znalosť jeho objektov, ktorých poloha je známa. Na stanovenie polohy

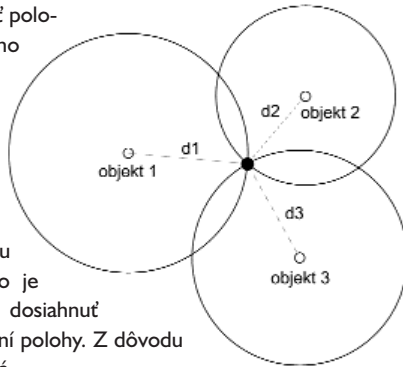


Obr.1 Navigácia na základe smeru k cieľu stanovenému v začiatočnej polohe

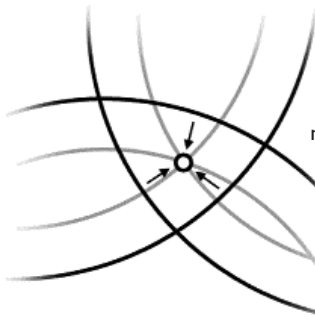


Obr.2 Poznanie polohy cieľa počas navigácie

v rovine (2D) stačí poznať polohu 3 objektov vzárodného systému (obr. 3), pričom na stanovenie polohy v priestore (3D) je už nevyhnutné poznanie 4 objektov známej polohy. Poznaním väčšieho počtu objektov priestoru so známou polohou, ako je minimálny počet, možno dosiahnuť vyššiu presnosť v stanovení polohy. Z dôvodu chýb merania však dochádza pri určení polohy k odchýlkam (obr. 4). Preto treba hovoriť o určení polohy s určitou presnosťou, definovanou presnosťou merania vzdialeností známych objektov vzárodného systému.



**Obr.3 Stanovenie polohy v rovine na základe znalosti polohy troch objektov prostredia**



**Obr.4 Chyba v stanovení polohy**

Navigáciu v prostredí využitím sledovania telies a objektov známej polohy využívali už moreplavci a karavány. Využívali orientáciu pomocou vesmírnych telies, ktorých poloha vzhľadom na pozorovateľa na Zemi bola známa. Takto bola možná navigácia aj v neznámom prostredí, ktoré bolo možné následne kartografovať a zmapovať.

Využíva sa aj stanovenie polohy na základe sledovania prejdenej vzdialenosti (odometrie) pri udržiavaní daného smeru. Táto metóda je však chybová a slúži len ako odhad. Možno ju však využiť kedykoľvek pri poznaní smeru a prejdenej vzdialenosti.

Dnes sa využívajú rôzne prístupy na stanovenie polohy založené na poznaní vzdialeností od známych objektov (vesmírnych telies, satelitov na obežnej dráhe Zeme a pod.), ktoré umožňujú určiť polohu v absolútnom súradnicovom systéme Zeme.

Využívajú aj prístupy, ktoré umožňujú stanoviť relatívnu zmenu polohy. Následnou integráciou zmien možno stanoviť absolútnu polohu, prípadne orientáciu. Integrácia však vnáša do týchto metód chybu, ktorú možno pri pohybe na väčšie vzdialenosti kompenzovať využitím absolútnych kalibračných bodov.

## Senzorový systém

V mobilnej robotike sa používa mnoho druhov snímačov, ktoré uplatňujú rôzne meracie techniky a zároveň využívajú rôzne rozhrania na získavanie údajov. Zameriame sa na tie druhy snímačov, ktoré majú uplatnenie v robotoch určených do vonkajších prostredí.

Snímače môžeme rozdeliť do viacerých kategórií. Jedným z prístupov je rozdelenie snímačov na interné (snímanie stavu robota) a externé (snímanie prostredia robota). Ďalším je rozdelenie snímačov na pasívne (snímajú prostredie bez zásahu do neho) alebo aktívne (pri snímaní do prostredia zasahujú). Pre roboty do vonkajšieho prostredia je vhodné snímače rozdeliť do týchto skupín:

### 1. Snímače špecifické na pohyb vo vonkajších prostrediach (úlohy lokalizácie a určenia polohy)

- GPS** – GPS je globálny polohový systém. Oficiálny názov systému je GPS NAVSTAR (NAVigation Signal for Timing And

Ranging). Absolútna poloha v troch rozmeroch akéhokoľvek GPS prijímača je vypočítaná trilaterálnymi metódami založenými na čase letu špecificky kódovaných širokospetralných rádiosignálov vysielaných satelitmi. Keď poznáme súradnice družíc, môžeme polohu používateľa určiť vypočítaním sústavy troch rovníc o troch neznámych. Meranie polohy by bolo jednoduché, ak by časové základne (hodiny) družíc a používateľa boli synchronné. Hlavný problém je teda meranie času, ktorý uplynie medzi vyslaním diaľkomerného signálu z GPS družice a jeho prijatím používateľským GPS prijímačom. Časová základňa používateľského zariadenia je posunutá o neznámy časový interval  $D_i$ , ktorý môžeme prepočítať na vzdialenosť  $b = c \cdot D_i$  ( $c$  – rýchlosť svetla). K neznámych súradniciam používateľa pristupuje teda neznáma  $b$  a na výpočet polohy potrebujeme celkom štyri rovnice:

$$(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2 = D_i + b$$

$$D_i = c \cdot t_{m_i}$$

$$i = 1, 2, 3, 4$$

GPS zariadenie generuje kópiu signálu vysielaného zvolenou družicou, túto kópiu zosynchronizuje s prijímaným signálom a meria posun ( $t_{m_i}$ ) začiatku tejto kópie vzhľadom na začiatok svojej časovej základne. Ak sa meranie uskutočňuje minimálne k štyrom družiciam, máme k dispozícii všetky veličiny potrebné na riešenie sústavy rovníc (neznáma poloha  $(x, y, z)$  a časový posun ( $D_i$ )).

- Magnetický kompas** – kompas je veľmi užitočný senzor pri úlohách vlastnej lokalizácie. Môže sa používať vo vonkajších aj vnútorných prostrediach. Problémy pri použití tohto snímača sú vyvolané citlivosťou na magnetické pole, preto sa zvykne používať istý spôsob kalibrácie spolu s GPS. Kompasy existujú v analógových (lacnejšie, nepresné) alebo digitálnych (komplexnejšie, presnejšie, drahšie) vyhotoveniach. V mobilnej robotike sa využívajú kompas: mechanické magnetické, magnetoinдуктивne, magnetoelastické, magnetorezistívne, s tokovou bránou a kompas s Hallovým efektom.

## 2. Snímače využiteľné na detekciu prekážok

- Ultrazvukové snímače** – patria do kategórie snímačov merajúcich vzdialenosti. Fungujú na princípe vyslania zvukového impulzu s dĺžkou okolo 1 ms s frekvenciou od 50 kHz až po 250 kHz a merania času letu signálu. Odmeraný čas je úmerný vzdialenosti najbližšej prekážky v kuželi snímača. Tento čas reprezentuje čas prechodu signálu k prekážke a naspäť do snímača. Ak nie je zaznamenaný žiadny signál v istom časovom obmedzení, potom nie je detegovaná žiadna prekážka v zodpovedajúcej meracej vzdialenosti (dosah snímača). Problémy pri použití týchto snímačov spôsobujú viacnásobné odrazy od prekážok a interferencie signálov pri použití viacerých ultrazvukových snímačov. Na odstránenie týchto problémov sa používa kódovanie vysielaných signálov. Vlastnosti snímačov závisia od útlmu v atmosfére, prúdenia vzduchu, teploty prostredia a od geometrie lúča. Napriek týmto problémom sú ultrazvukové snímače veľmi praktickým a využiteľným senzorovým systémom. Dokážu detegovať aj sklenené priehľadné prekážky, s ktorými majú iné snímače problémy.
- Laserové snímače** – výhodou ich použitia je takmer presná 2D mapa prostredia z pohľadu robota alebo komplexná 3D mapa. Nevýhodou sú ich rozmery a cena. Vzhľadom na využitie vo vonkajších prostrediach môže byť ich veľkou nevýhodou závislosť od vlastností prostredia. V prašnom alebo veternom prostredí sú prakticky nepoužiteľné.
- Infračervené snímače** – používajú infračervenú diódu spolu s detekčným polom. Uhol, pod ktorým sa odrazený lúč dostane do prijímača, sa mení v závislosti od vzdialenosti objektu. Typickou vlnovou dĺžkou pre tento druh snímačov je



880 nm. Je to teda neviditeľné žiarenie pre ľudské oko, ale môže byť pretransformované infračerveným detekčným mechanizmom (karta alebo kamera). Tieto typy snímačov majú nelineárne charakteristiky, preto je potrebná ich kalibrácia. Ďalším problémom je detekcia vzdialenosti menšej ako 6 cm. Tieto vzdialenosti sú pod meracím rozsahom a vedú k nekorrektnému snímaniu.

- d. **Dotykové a približovacie snímače** – dotykové snímače sa používajú v mobilnej robotike ako prostriedok indikácie kolízie s okolím. Detekcia zahŕňa priamy fyzický kontakt medzi snímačom a nejakým objektom v prostredí. Približovacie snímače sú nekontaktné a v predstihu detegujú prítomnosť objektu, s ktorým hrozí kolízia. Dotykové a približovacie snímače fungujú na rôznych fyzikálnych princípoch (magnetické, piezorezistívne, ultrazvukové, fotoelektrické, kapacitné, kontaktné, optické, indukčné atď.).

### 3. Snímanie pohybu a orientácie robota

- a. **Akcelerometre** – snímajú zrýchlenie v jednej osi. Tieto jednoduché snímače majú mnoho nevýhod a obmedzení. Väčšina z nich sa nevie vyrovnáť s vibráciami, ktoré sa často vyskytujú pri robotoch pohybujúcich sa vo vonkajšom prostredí. Potrebná je filtrácia signálu. Riešením je aj použitie gyroskopu, inklinometra a využitie fúzie informácií. Niektoré druhy akcelerometrov dokážu merať zrýchlenia v dvoch osiach. Využitie tohto typu snímačov je z hľadiska obmedzenia zrýchlenia pohybu robota.
- b. **Inklinometre** – merajú absolútny uhol otočenia okolo jednej osi v špecifikovanom rozsahu. Pretože merajú absolútny uhol otočenia a nie jeho deriváciu, sú vhodnejšie na určovanie orientácie robota. Ich nevýhodou je tiež citlivosť na vibrácie.
- c. **Gyroskopy** – sú nesenzitívne na elektromagnetické a feromagnetické anomálie, ktoré ovplyvňujú napríklad kompas, a sú využiteľné aj v priestoroch, kde neexistuje žiadne geomagnetické pole (vo vesmíre), alebo v situáciách, kde je lokálne pole rušené. Gyroskopy rozdeľujeme do dvoch základných kategórií: mechanické a optické. Mechanické gyroskopy fungujú na princípe snímania zmeny v smere aktívneho trvalého uhlového alebo lineárneho momentu, ktorý môže byť spojený alebo periodický. Najznámejšou konfiguráciou je gyroskop so zotrvačníkom, spoľahlivý senzor orientácie, založený na inerciálnych vlastnostiach rýchlo sa otáčajúceho rotora. Optické gyroskopy majú málo sa pohybujúce alebo vôbec sa nepohybujúce časti, sú jednoduché na obsluhu a nemajú citlivosť na gravitačné pole. Základnou myšlienkou optického gyroskopu sú dva laserové lúče vysielané v opačných smeroch vnútri uzavretej cesty (napríklad v tvare kruhu). Majú vysoký dynamický rozsah a nízku cenu. Problémom gyroskopov je možnosť snímať len zmeny orientácie (obvykle v jednej osi), ale nie absolútnu rotáciu okolo osi. Na získanie absolútnej informácie je potrebná integrácia snímaného signálu v čase. Vypočítaná orientácia však integruje aj chyby vnášané do samotného výpočtu podobne ako pri odometrii.

- d. **Odometria** – je najjednoduchší spôsob určenia polohy mobilného robota. Poloha je určená zo známych predchádzajúcich polôh. Všeobecný princíp odometrie zahŕňa enkodéry priamo spriahnuté s rotorom motora alebo s osou kolesa. Natočenie robota potom môže byť: 1. nepriamo odvodené zo snímača natočenia (kompas, gyroskop), 2. vypočítané z diferenciálnej odometrie. Inkrementálny posun pozdĺž trajektórie je rozložený do zložiek  $x$  a  $y$ . Pri priamej a rovnej trajektórii môžeme povedať, že aktuálna pozícia robota sa rovná súčtu predchádzajúcej pozície a zmeny v tejto polohe:

$$x_{n+1} = x_n + D \sin \theta,$$

$$y_{n+1} = y_n + D \cos \theta,$$

kde  $D$  je posun pozdĺž trajektórie a  $\theta$  natočenie robota. Pri komplikovanejších tvaroch trajektórie je aj výpočet zložitejší.

Pri využití odometrie sa zvykne používať viacero druhov snímačov rotačného posunu alebo rýchlosti (kefkové, optické, magnetické, indukčné a kapacitné enkodéry, potenciometre, resolvery, selsyny). Najčastejšie je však použitie optických enkodérov.

4. **Bezpečnostné senzory** – do tejto skupiny patria snímače stavu batérií, teplotné senzory, snímače napätia a prúdu, snímače komunikácie apod. Slúžia na zistenie stavu jednotlivých systémov robota. Snímače komunikácie robota s externou riadiacou jednotkou možno využiť aj v riadení – aby robot nevyšiel z dosahu komunikácie s touto riadiacou jednotkou (napr. pri bezdrôtovom spojení). Takisto možno snímače batérií využiť v riadení, napr. na vypnutie nepotrebných systémov alebo na spomalenie pohybu tak, aby bol robot schopný bezpečne prejsť určenú cestu aj pri nízkej kapacite batérií.
5. **Vizuálny systém** – v podobe digitálnej kamery je najkomplexnejším snímačom používaným v mobilnej robotike. Uplatňuje sa prakticky pri všetkých úlohách spojených s mobilnou robotikou. V mobilnej robotike sa uplatňujú kamery s vysokým počtom snímkov, pretože robot je v pohybe a je potreba aktualizovať informácie zo senzora čo najrýchlejšie. Zvýšená rýchlosť snímania však obmedzuje rozlíšenie kamery. Preto treba zvoliť vhodný pomer medzi rozlíšením kamery a jej rýchlosťou snímania, či už podľa úlohy vizuálneho systému alebo samotného robota. Treba počítať aj s tým, že rýchlosť snímania kamery sa zníži aj aplikovaním algoritmov spracovania obrazu. Rozlíšenie kamery musí byť dosť veľké na to, aby bolo možné detegovať požadovaný objekt zo špecifickej vzdialenosti. Doteraz dominujúce čipy CCD (z angl. charge coupled device) nahrádzajú lacnejšie čipy CMOS (z angl. complementary metal oxide semiconductor). Tieto lacnejšie čipy majú aj vyššiu citlivosť na jas. Snímače poskytujú niekoľko odlišných interfejsových protokolov. Na jednej strane to umožňuje univerzálnejší hardvérový dizajn, na druhej strane snímače sa stali omnoho komplexnejšími. Štandardný kamerový čip má svoj vlastný hodinový signál a posielajú informáciu ako tok obrázkov. Tým sú určené aj požiadavky na CPU, ktorá musí byť dostatočne rýchla. Obvykle sa v kamerových čipoch dajú nastaviť tieto parametre: rýchlosť snímkovania (fps), začiatok obrazu v  $x$  a  $y$ , veľkosť obrazu, jas, kontrast, intenzita farieb a pod. Najjednoduchší kamerový interfejs spočíva v pripojení hodín kamery na prerušenie CPU, zatiaľ čo výstup z kamery je pripojený priamo na dátovú zbernicu. Každý obrázok z kamery spôsobí prerušenie v CPU, ktorá povolí výstup kamery a načíta jeden obrázok z dátovej zbernice. Jednotlivé obrázky získané z kamery sa porovnávajú s predchádzajúcimi a pri snímaní približne rovnakého poľa viditeľnosti môžeme určiť výrazné odchýlky. Jednoduché algoritmy potom dokážu určiť lokáciu, smer pohybu a aj veľkosť objektu. Vizuálny systém možno použiť aj na detekciu statických prekážok v prostredí. Možno odvodiť aj vlastnosti objektov, nielen ich existenciu [Hla05], [Hor06]. Na základe nejakých orientačných bodov v priestore možno pomocou kamery určiť aj presnú polohu robota.
6. **Kalibrácia snímačov** – ak predpokladáme vhodnú konfiguráciu senzorového systému pre danú outdoorovú aplikáciu, je nutné aj správne nastavenie jednotlivých snímačov. Je to najmä požiadavka spojená s úlohami, ktoré ma daný subsenzorový systém riešiť. Predovšetkým treba zvoliť vhodný pomer rýchlosť/presnosť. Pri väčšej presnosti treba počítať s pomalším spracovaním údajov, najmä pri komplexnejších snímačoch a naopak. Pri aplikovaní fúzie snímačov a ich údajov treba uvažovať aj nad správnou voľbou periódy vzorkovania snímačov. Napríklad pri kooperatívnej fúzii na strednej úrovni nemôže jeden typ snímača spracovávať údaje dvakrát pomalšie ako iný typ snímača, použitý v tejto fúzii. Dnes sú snímače už komplexnými systémami a možno na nich nastaviť aj alarmy, ofsety, mierkovanie, prah, počet vzoriek atď.





## Algoritmy, riadiace systémy, komunikácia

Riadiace systémy mobilných robotických systémov pozostávajú z blokov, ktoré na základe algoritmov vyhodnocujú aktuálnu situáciu prostredia a stavov, v ktorých sa robotický systém nachádza a následne vytvárajú riadiace príkazy pre samotnú mechaniku robota. Väčšina informácií sa dostáva do riadiaceho systému zo senzoroého systému. Tieto informácie môžu byť priamo zo senzorov – tzv. „surové“ dáta, teda riadiaci systém si dáta zo senzorov spracuje sám a výsledné informácie využije na vyhodnotenie. Druhý spôsob prijmu informácií je, že subsystemy na spracovanie vyhodnotia „surové“ dáta zo senzorov a vyhodnotené informácie odovzdajú riadiacemu systému, ktorý na ich základe rozhodne o ďalších potrebných procesoch pre robotický systém.

Spracovanie informácií môžeme definovať ako operácie, ktorými sa v systéme informácie triedia a upravujú tak, aby boli vhodné na vyhodnotenie a vykonanie určitého procesu. V mobilných robotických systémoch je vhodné využiť integráciu informácií zo senzorov.

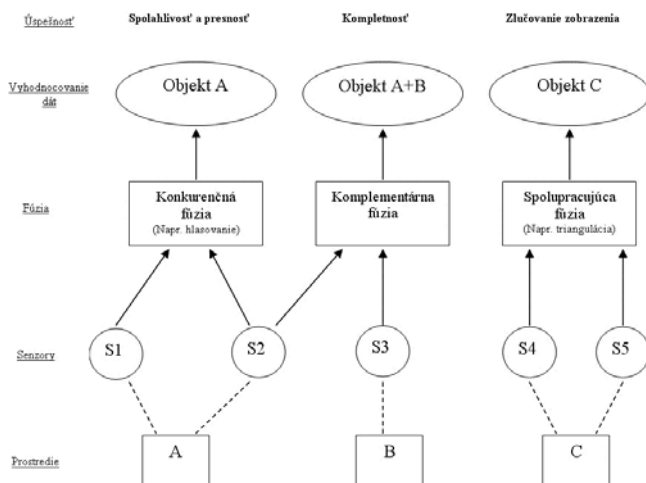
### Integrácia informácie zo senzorov

Existujú nezrovnalosti v terminológiách pre integráciu informácií. Termíny ako „senzorová fúzia“, „dátová fúzia“, „fúzia informácií“, „multisenzorová fúzia dát“ a „multisenzorová integrácia“ sa používajú v technickej literatúre na označenie rozličných techník, technológií, systémov a aplikácií, ktoré využívajú dáta z viacerých zdrojov informácií. Rozsah implementácií integrácie informácií môže byť od fúzie informácií zo senzorov v reálnom čase pre navigáciu mobilných robotov po off-line fúziu, spracovanie dát, ktoré vyhodnotil človek alebo technická inteligencia [Rot91]. V našom prípade definujeme dva pojmy:

**Fúzia informácií** obsahuje teóriu, techniky a nástroje predstavujúce využitie synergie v informáciách získaných z viacerých zdrojov (senzorov, databáz, informácií získaných človekom a pod.), kde následné vyhodnocovanie, rozhodovanie alebo vykonávané akcie sú vo svojom zmysle lepšie (kvalitatívne alebo kvantitatívne, v termínoch správnosti, robustnosti a pod.), ako keby boli tieto informácie použité alebo vyhodnocované jednotlivito bez využitia ich vzájomnej synergie. [ISIF]

Termín „senzorová fúzia“ spadá do podmnožiny fúzie informácií. Definovaný je takto: **Senzorová fúzia** je kombinácia dát zo senzorov alebo dát extrahovaných zo senzorových dát, kde výsledná informácia je vo svojom zmysle lepšia, ako keby boli jednotlivé zdroje použité individuálne.

Vo všeobecnosti sa senzorové systémy skladajú z rôznych druhov senzorov, ktorých informácie a formát dodávaných údajov sa vo väčšine prípadov diametrálne líšia. Pre systém ako taký treba interpretovať tieto informácie z rôznych formátov do jednotného formátu, s ktorým dokáže narábať. Samotné aplikácie však musia byť navrhnuté a skonštruované tak, aby neboli priamo závislé od jednotlivých senzorov a tak isto senzorový subsystem by mal byť navrhnutý tak, aby v prípade výpadkov alebo porúch nebol ovplyvnený chod celého systému. Primárne by sa mali brať do úvahy tieto aspekty:



Obr.5 Konkurenčná, komplementárna a spolupracujúca fúzia

**Porucha senzora:** Z dôvodu zníženého rozlíšenia (citlivosti) na nežiadané javy, chyby merania a celkovo možnosť straty senzora by aplikácia nikdy nemala byť závislá od konkrétnej senzorovej informácie.

**Požiadavky reálneho času:** Zabudované systémy musia vykonávať operácie v reálnom čase. Tzv. časové chyby v takýchto aplikáciách môžu ohroziť obsluhu aj samotné zariadenie.

**Požiadavky závislosti:** Zabudované systémy sú integrované do väčších systémov, ktoré závisia od zabudovaných subsystemov. Zabudovaný systém by mal byť navrhnutý a implementovaný spôsobom, ktorý zaručí jeho odolnosť. Mal by zabezpečovať konkrétnu službu, aj keď zlyhá niektorá časť jeho komponentov. Pri takejto tolerancii chýb sa vyžaduje dôkladný návrh systému s dôrazom na možnosti vyskytnutia sa chýb v jeho komponentoch.

**Požiadavky na zložitosť manažmentu:** Často vzniká situácia, keď treba rozdeliť zložitý systém (napríklad softvér robota s distribuovaným senzoroým a pohonným systémom) na malé zrozumiteľné subsystemy z dôvodu jednoduchej implementácie a testovania.

Senzorové systémy alebo siete môžu byť kategorizované na základe typov senzorových konfigurácií. Podľa [DW88] môžeme integráciu informácií zaradiť do troch skupín (obr. 5).

**Komplementárna:** Senzorová fúzia sa nazýva komplementárna vtedy, keď senzor nie je priamo závislý od iných senzorov, avšak môže byť kombinovaný tak, aby výsledok kombinácie dával ucelený výstup. Táto metóda zabraňuje prípadným stratám údajov zo senzorov, pretože vždy bude existovať nejaká náhrada. Na obr. 5 je znázornený senzor S2 a S3, ktoré reprezentujú komplementárnu konfiguráciu, pretože každý senzor sníma iný priestor v prostredí.

**Konkurenčná:** Senzorová fúzia sa nazýva konkurenčná vtedy, keď každý senzor dodáva nezávislé merania toho istého prostredia alebo objektu. Konkurenčná metóda sa niekedy nazýva aj redundantná konfigurácia. [Luo89]. V špeciálnych prípadoch môže byť konkurenčná senzorová fúzia chybovo tolerantná (fault tolerance). Chybovo tolerantná metóda vyžaduje presnú špecifikáciu služby systému, ktorú má vykonávať, a tiež chybových módov systému. Ak je chyba zastrešená chybovou hypotézou, systém musí vždy vykonávať požadované služby. Aj táto metóda môže byť odolná, pretože dokáže pracovať aj pri degradovaných údajoch, všetko však závisí od špecifikácie a požiadaviek. Na obr. 5 sú znázornené senzory S1 a S2, ktoré reprezentujú konkurenčnú konfiguráciu a redundantne snímajú rovnakú časť objektu alebo prostredia.

**Spolupracujúca:** Spolupracujúca senzorová sieť používa informácie z minimálne dvoch nezávislých senzorov na získanie informácie, ktorá by nemohla byť dostupná pri využití len jedného senzora. Na obr. 5 senzory S4 a S5 reprezentujú spolupracujúcu konfiguráciu. Oba senzory snímajú ten istý objekt, avšak výsledok merania je vytvorený spojením snímaných informácií o objekte, kde výsledok by nemohol byť dosiahnutý len pri použití jedného senzora.

Tieto typy kategórií sa málokedy používajú samostatne. Vo väčšine systémov a implementácií sa využívajú všetky kategórie alebo kombinácie týchto kategórií. Ako príklad takejto hybridnej implementácie môžeme uviesť aplikáciu viacerých kamier monitorujúcich jednu oblasť. V regiónoch zachytávaných dvoma a viacerými kamerami je vhodné využiť konfigurácie spolupracujúce alebo konkurenčné. Pre región zachytávaný len jednou kamerou je vhodné použiť komplementárnu konfiguráciu.

Nové metódy v aplikovaní integrácií informácií využívajú metodiku aktivácie procesu v časovej jednotke tzv. time-trigger metodiky. Time-trigger systémy sa skladajú z dvoch uzlov na časové vnímanie. Časovač všetkých uzlov je synchronizovaný pre potreby globálneho pohľadu na čas. Preto majú vykonávanie komunikácie a aplikačné úlohy svoje miesto v predurčených bodoch v čase. S výnimkou časovacieho mechanizmu sú všetky uzly navzájom nezávislé. Architektúra založená na time-trigger spĺňa závislosť požiadaviek pre implementáciu chýb tolerantných systémov použitím nezávislých redundantných kompo-



mentov. Dodatočná sensorová fúzia redundantných senzorov vytvára aplikáciu odolnejšiu proti vonkajším a vnútorným chybám. V prípade vyskytnutia chyby budú ostatné algoritmy pre sensorovú fúziu schopné poskytovať degradovanú úroveň služieb, preto je aplikácia schopná pokračovať vo svojich operáciách a poskytovať požadované služby.

Zložitosť manažmentu je podporovaná priamo sensorovou fúziou, ako aj distribuovanými systémami s time-trigger mechanizmom. Sensorová fúzia určuje vnútornú reprezentáciu vlastností prostredia, ktoré sú pozorované senzormi. Preto môže byť riadiaca aplikácia oddelená od fyzických senzorov, čo má za následok zlepšenie udržiavateľnosti a použiteľnosti algoritmov. Navyše architektúra založená na time-trigger podporuje tvarovateľnosť návrhov aplikácií v reálnom čase rozdelením zložitých systémov na malé zrozumiteľné komponenty. Systémový návrhár zavádza rozhrania, ktoré sú priamo definované v hodnotách a časových doménach pre každý komponent. Potom všetky komponenty môžu byť implementované a testované oddelene. Princíp tvarovania prináša možnosť udržiavať oddelene testované funkcionality komponentov v celej aplikácii.

Existuje nespočetné množstvo metód a algoritmov pre sensorovú fúziu – v literatúre sa odlišujú algoritmy filtrov (napríklad Kalmanove filtre), súlad senzorov (napríklad hlasovanie, výber senzorov, chybovo tolerantné senzory), modelovanie objektov (obsadená mriežka), rozhodovacie metódy (Bayesova dedukcia, Dempsterova-Shaferova dedukcia, fuzzy logická dedukcia). Práce opisujúce systémy založené na časovo aktivačnom mechanizme (time-triggered systems) sú opísané cez rôzne architektúry (manažovateľné systémy v reálnom čase [Kop93], architektúra s procesom aktivovaným v čase (time-trigger), komunikačné protokoly (TTP/S, TTP/A, LIN a i.).

Pri činnosti robota treba uvažovať s úlohami, ktoré majú charakter pohybu na základe informácií z blízkeho okolia (úlohy a algoritmy lokálneho riadenia), a s úlohami, ktoré vyžadujú globálne informácie o prostredí a o vzťahu robota k prostrediu (úlohy a algoritmy globálneho riadenia). Lokálne riadenie zabezpečuje prieskum prostredia a vyhýbanie sa prekážkam, globálne riadenie umožňuje plánovanie činnosti robota a pohyb do cieľa po želanej trajektórii.

Existujú rôzne komunikačné protokoly, ktorými dokáže robot komunikovať so svojimi komponentmi. V závislosti od zložitosti robota a aplikácie robota v prostredí sú použité rôzne druhy komunikácie, od základnej komunikácie cez udalosti, ktoré aktivujú ostatné komponenty v systéme, cez otvorené CAN protokoly a iné balíčkové metódy komunikácie až po protokoly odolné proti rušeniam, zložité na spracovanie kvánt dát a zabezpečené protokoly na minimalizáciu nebezpečenstva nepriaznivého vplyvu pri využití vo vojenských systémoch. Vo väčšine prípadov implementácie komunikácie sa využíva jednotný systém – rovnaký protokol pre všetky komunikácie alebo kombinácia protokolov v závislosti od potreby.

Pri jednoduchšej komunikácii senzorov, ktorých výstup nie je rozsiahly alebo je minimálny na dátové zaťaženie, sa využívajú jednoduché protokoly, ako sú CAN (Controller area network) alebo iné jednoduché frame based protokoly. Výhodou týchto protokolov je ich jednoduchosť pri aplikovaní, možnosť zapojenia neobmedzeného množstva senzorov do siete a tiež možnosť prepojenia priamo na výkonové jednotky bez nutnosti prepájania cez rozhodovacie subsystemy. Pomocou týchto protokolov je výhodné prenášať aj stavové veličiny robota, teda vnútorné stavy jednotlivých subsystemov, ktoré od seba závisia alebo vykonávajú operácie, o ktorých by mali vedieť aj iné subsystemy. Nejde teda o prenos zložitých dátových balíčkov, ale len o prenos jednoduchých informácií.

Pri zložitej komunikácii senzorov, napríklad laserových senzorov, sonarov, vizuálnych systémov, treba využiť zložitejšie protokoly, ktoré dokážu prenášať väčšie dátové balíčky. Tieto balíčky smerujú do jednotiek na spracovanie a vyhodnocovanie. Dôležitosť vyplýva zo samotnej koncepcie zložitosti, preto by mal byť výber protokolov viazaný na využitie robotického systému v prostredí (rušivé vplyvy, zabezpečenie a pod.).

Pri zabezpečených komunikačných kanáloch treba brať ohľad na samotné zaťaženie pri odosielaní (zakódovaní) aj pri prijímaní informácií (dekódovaní). Tieto operácie sú založené na zložitých algoritmoch, a preto vyčerpávajú značnú časť výpočtových prostriedkov. V praxi sa takáto komunikácia využíva hlavne pri vojenských robotoch s rozloženou inteligenciou, keď treba zabezpečiť bezpečnú komunikáciu medzi jednotlivými robotickými systémami.

Úlohy realizácie systémov s rozloženou inteligenciou sú aktuálne. V praxi si môžeme predstaviť mobilné roboty, ktoré sú navzájom prepojené a dokážu navzájom využívať informácie medzi sebou. Toto spoločné využívanie možno následne zužitkovať pri rozhodovaní sa v lokálnom alebo globálnom meradle. Takéto systémy začínajú byť testované a realizované na vojenské účely, kde rozložená inteligencia v robotoch pomáha identifikovať nepriateľa a spoločne koordinovať akcie. V súčasnosti známe roboty nie sú vybavené zbraňovými systémami, používajú sa skôr na prieskum terénu.

Na verejné účely sa pracuje na pátracích robotoch na hľadanie objektov alebo ľudí v troskách alebo na strážení štátnych hraníc.

### Príklad outdoorového systému

Príkladom aplikácie outdoorového systému je robot MRVK01, ktorý bol zostrojený v ZŤS VVU Košice, a. s. Radiace algoritmy boli zostavené na URPI FEI STU Bratislava. Robot má štvorkolesový podvozok s diferenciálnym spôsobom riadenia pohybu, ktorý je schopný prejazdu členitejším terénom. Robot je poháňaný dvoma motormi Baumuller GDM100N2 330/0710. Prevod krútiaceho momentu na kolesá je riešený dvojstupňovými prevodovkami. Prevodový pomer teda možno meniť v troch stupňoch: 1 : 1, 1 : 2 a neutrál. Na výstupných hriadeľoch dvojstupňovej prevodovky sú umiestnené prevodovky SPINEA s pevným prevodovým pomerom. Otáčky hriadeľa motora a otáčky výstupného hriadeľa sú snímané rotačnými inkrementálnymi snímačmi USdigital E7MS, ktoré sa dajú využiť na odometriu. Robot je napájaný z akumulátorových paketov, z ktorých jeden je tvorený jedenástimi NiMH článkami SAFT VHF15000 (nominálne napätie 1,2 V, kapacita 15 Ah).

Robot MRVK01 je vybavený farebnou kamerou FCB-IX11AP (1/4" super HAD CCD, 40x ZOOM (10x optický/4x digitálny), 460 TVr). Kamera je polohovaná dvojicou servopohonov. Možno ju polohovať v horizontálnej rovine v rozsahu -120° až +180° a vo vertikálnej rovine -30° až +90°. Okrem vizuálneho systému je robot vybavený aj radom mnohých iných snímačov: laserovým skenerom Hokuyo URG-04LX, GPS prijímačom GARMIN GPS 18-5Hz, 3x gyroskopom ADIS16250, 1x dvojosovým inklinometrom/akcelerometrom ADIS16201, 1x jednoosovým akcelerometrom ADXL103, 2x jednoosovým inklinometrom ADIS16203, 6x ultrazvukovým meračom vzdialenosti MaxSonar EZ-1, 2x ultrazvukovým meračom vzdialenosti SRF08, 1x modulom kompasu CMPS03 a potenciometrom snímajúcim vzájomný uhol natočenia oboch pohonných jednotiek.

Riadiaci systém tvorí počítač UNO-2059E-IDA0E od firmy Advantech. Je to bezchladičový 400 MHz priemyselný počítač s 256 MB RAM a 1 GB HDD typu Compact Flash. Okrem rozhraní na myš, klávesnicu, SVGA, 2x USB a LAN disponuje aj štyrmi COM portmi (RS 232, RS 422 alebo RS 485) a jedným PCMCIA slotom. K počítaču je pripojený 54 Mbps multifunkčný bezdrôtový 2,4 GHz access point WL-5460AP na bezdrôtovú komunikáciu robota so vzdialeným počítačom.

Takto hardvérový vybavený robot s navrhnutými algoritmi riadenia bol použitý na súťaži Robotour 2007 v Prahe. Úlohou bolo prejsť trasu dlhú približne 1 km, ktorá sa skladala z rôznych úsekov. Úseky boli rôznorodé, od križovatiek cez rovné úseky, od úsekov s dlaždicami po asfaltové úseky a od úsekov bez prekážok až po úseky so statickými prekážkami. Za prejdienie jedného úseku bolo možné získať jeden bod, pri prejdieni úseku s nejakou užitočnou záťažou 2 body. Pre náš robot bolo možné zostaviť riadenie s rôznymi stratégiemi. Nakoniec sa pre túto súťaž ukázala ako najúčinnejšia stratégia použitie kompasu a odo-



metrie. Robot sa v súťaži umiestnil na druhom mieste (viac na [www.robotika.cz/competitions/robotour2007](http://www.robotika.cz/competitions/robotour2007)).

## Záver

Mobilné roboty poskytujú vo všeobecnosti možnosť pohybu zariadení v 3D priestore. Vznikajú tým možnosti vytvorenia technických systémov, ktoré budú môcť spolupracovať s operátorom, poskytovať pomoc, budú schopné pracovať v zložitom a pre človeka nevhodnom priestore a pod. Tieto nové možnosti však zároveň prinášajú nové, náročné požiadavky na komplexné systémy riadenia týchto zariadení.

Článok vznikol za podpory grantu VEGA 1/3120/06.

## Literatúra

[Brä06] Bräunl, T.: Embedded Robotics. Mobile Robot Design and Applications with Embedded Systems. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2006, ISBN 3-540-34318-0.

[CAN] <http://www.can-cia.org/can/protocol/> – Controller Area Network (CAN) – Protocol

[Cue05] Cuesta, F. – Ollero, A.: Intelligent Mobile Robot Navigation. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2005. ISBN 3-540-23956-1.

[DW88] Durrant-Whyte, H. F.: Sensor Models and Multisensor Integration. International Journal of Robotics Research, 7(6): 971-113, Dec. 1988.

[Eve95] Everett, H. R.: Sensors for Mobile Robots (Theory and Application). A K Peters, Ltd, 1995, ISBN 1-56881-048-2.

[Hla05] Hlaváč, V. – Sedláček, M.: Zpracování signálů a obrazů. Praha: ČVUT 2005. ISBN 80-01-03110-1.

[Hor06] Horner, A.: Handbook of Machine Vision. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2006. ISBN 3-527-40584-4.

[Hub05] Hubinský, P. – Štefanka, J.: Využitie algoritmu SOMA pri eliminácii reziduálnych kmitov dvojhmotového systému s pružným členom. In: AT&P JOURNAL PLUS6, mechatronika CD, 2005, s. 104 – 107.

[Hub05-2] Hubinský, P. – Vranka, B.: Input Shaping Preventing the Excitation of Oscillation Applied to the Voronoi Diagram Planned Path. In: AT&P JOURNAL PLUS6, mechatronika CD, 2005, s. 108 – 111.

[ISIF] International Society of Information Fusion (<http://www.inforfusion.org/mission.htm>)

[Kar05] Kardoš, J.: Reaching Law Modification of Time Sub/optimal Variable Structure Control. International Journal of Mechanics and Control, vol. 06, No. 02, 2005, p. 39 – 49.

[Kar07] Kardoš, J.: The Force Following Control at the Robot End-point. Automatizace, č. 5, 2007, s. 341 – 346.

[Kar07-2] Kardoš, J.: Teória systémov s premenlivou štruktúrou a časovo suboptimálne riadenie polohy. Bratislava: HMH, s. r. o. 2007. ISBN 978-80-969725-0-0.

[Kop93] Kopetz, H. – Fohler, G. – Grunsteidl, G. – Kantz, H. – Pospischil, G. – Puschner, P. – Reisinger, J. – Schlatterbeck, R. – Schutz, W. – Vrchotický, A. – Zainlinger, R.: Real-Time System Development: The Programming Model of MARS. In Proceedings of the IEEE International Symposium on Autonomous Decentralized Systems. 190 – 199, Kawasaki, Japan, Apr. 1993.

[Luo89] Luo, R. C. – Kay, M.: Multisensor Integration and Fusion in Intelligent Systems. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 19(5): 901-930, Sep. – Oct. 1989.

[LZ05] Žalud, L.: Teleoperated Reconnaissance Robotic Systems – Hab. Thesis, Brno, 9/2005.

[Pro.Smi01] Probert Smith, P.: Active Sensors for Local Planning in Mobile Robotics. World Scientific Publishing, Co. 2001. ISBN 981-02-4681-1.

[Rot91] Rothman, P. L. – Denton, R. V.: Fusion or Confusion: Knowledge or Nonsense? SPIE Data Structures and Target Classification, 1470: 212, 1991.

[Štef06] Štefanka, J. – Hubinský, P.: Moderné prístupy riešenia optimalizačných problémov pomocou metód evolučných výpočtov. In: ATP Journal č. 2, ročník XIII. 2006, s. 71 – 73.

[Vit02] Vitko, A. – Savel, M. – Markusek, J.: Intelligent Learning Navigation Strategy of Legged Robot. In: Int. Symp. on Measurement and Control in Robotics. June 20 – 21, 2002, Bourges, France, 1 – 5.

[Vor05] Vörös, J.: Mobile Robot Path Planning using Quadtree-based Potential Fields. In: AT&P JOURNAL PLUS6 Mechatronika 2005 CD, s. 71 – 75.

[Vor06] Vörös, J.: Quadtree-based Representations of Grid-oriented Data. Image and Vision Computing 24/2006/263-270.

**prof. Ing. Ladislav Jurišica, PhD.**

**Ing. Roman Murár, PhD.**

**Ing. František Duchoň**

**Ing. Marian Klúčik**

**Ing. Lubomír Petrovič**

**Slovenská technická univerzita v Bratislave**

**Fakulta elektrotechniky a informatiky**

**Ústav riadenia a priemyselnej informatiky**

**Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava**

63