

Ing. Richard Balogh

Príspevok k metodike návrhu mobilných robotov

Autoreferát dizertačnej práce

na získanie akademického titulu
doktor (*philosophiae doctor*, PhD.)

v doktorandskom študijnom programe
5.2.14 Automatizácia a riadenie

Bratislava 2013

Dizertačná práca bola vypracovaná v externej forme doktorandského štúdia na Ústave riadenia a priemyselnej informatiky Fakulty elektrotechniky a informatiky Slovenskej technickej univerzity v Bratislave.

Predkladateľ: Ing. Richard Balogh

Ústav riadenia a priemyselnej informatiky
Fakulta elektrotechniky a informatiky STU
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Školiteľ: prof. Ing. Anton Vitko, PhD.

Ústav riadenia a priemyselnej informatiky
Fakulta elektrotechniky a informatiky STU
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Oponenti: prof. Ing. Juraj Spalek, PhD.

Žilinská univerzita
Elektrotechnická fakulta
Katedra riadiacich a informačných systémov
Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina

doc. Ing. Michal Kelemen, PhD.

Technická univerzita v Košiciach
Strojnícka fakulta
Katedra aplikovanej mechaniky a mechatroniky
Letná 9, 042 00 Košice

Autoreferát bol rozoslaný dňa _____.

Obhajoba dizertačnej práce sa koná
dňa 25. júna 2013 o 11:00 hod

na Fakulte elektrotechniky a informatiky STU v Bratislave, Ilkovičova 3, Bratislava,
v miestnosti D-424 pred komisiou pre obhajobu dizertačnej práce doktorandského
štúdia vymenovanou predsedom spoločnej odborovej komisie 5–2–14 Automatizácia.

prof. RNDr. Gabriel Juhás, PhD.
dekan FEI STU

Príspevok k metodike návrhu mobilných robotov

Súhrn

Predložená práca na analytickej báze podáva prehľad o výskume, vývoji a budúcich aplikáciach robotických systémov. Aplikácie sú smerované najmä k ich využitiu v systémoch s rozloženou inteligenciou (*ambient intelligence*). V práci sa venujeme analýze energetickej náročnosti mobilného robota z hľadiska stupňa autonómnosti robota. Navrhli sme metodiku, ktorú je možné využiť v návrhovej fáze. Na jej základe je možné rozhodnúť o rozmiestnení komponentov robota a prípadnom využití prostriedkov ambientnej inteligencie. Ďalej navrhujeme modulárny robotický systém Acrob, bezprostredne využiteľný vo výučbe a výskume na rýchle overenie hypotéz a návrh nových experimentov. Súčasťou práce je aj pokus o identifikáciu výrazných smerov, ktorými by sa ďalší výskum v tejto oblasti mal uberať.

Kľúčové slová: mobilný robot, modularita, decentralizovaná robotika, ambientná inteligencia

Contribution to the methodology of mobile robots design

Abstract

The thesis offers an analytical overview of the research, developments and future applications of robotic systems. Applications are focused on their use in systems with ambient intelligence. We analyse energy consumption of the mobile robot based on the degree of autonomy of the robot. We propose a methodology, which can be used in the design phase. On its basis one can decide how to deploy components of the robot and to consider usage of ambient intelligence resources. Furthermore, a modular robotic system Acrob for education and research is designed. It's purpose is to help with rapid testing and experimental designs. We also attempt to identify the major directions of the research in this area.

Keywords: mobile robot, modularity, decentralized robotics, ambient intelligence

Obsah

1	Úvod	5
2	Bariéry	6
3	Možnosti riešenia	7
4	Optimalizácia stupňa autonómnosti mobilného robota	8
4.1	Analýza	9
4.2	Batérie	9
4.3	Senzory	10
4.4	Komunikačný subsystém	10
4.5	Riadiaca jednotka	10
4.6	Mechanická zložka	11
4.7	Stupeň autonómnosti	11
4.8	Optimalizácia doby prevádzky	12
5	Modulárny robotický systém Acrob	14
5.1	Metodika návrhu	15
5.1.1	Interakčný priestor	16
5.1.2	Distribúovaná inteligencia	17
5.2	Acrob: mechanická úroveň	18
5.3	Acrob: komunikačné rozhranie	19
5.4	Acrob: rozhranie HMI	20
5.5	Acrob: akčné členy	21
5.6	Acrob: senzory	22
5.7	Softvérová modularita	22
5.8	Modularita v praxi	23
6	Bioinšpirácia: experiment v interaktívnom inteligentnom prostredí	24
7	Záver	26

1 Úvod

V súčasnej dobe nájdeme roboty všade tam, kde je prostredie pre človeka príliš nebezpečné, monotónne či únavné. Roboty sa už dávno udomácnili v priemysle, postupne si nachádzajú cestu aj do našich domácností.

Na mnohých miestach roboty nahrádzajú ľudí – sú presnejšie, rýchlejšie a menej náročné na kvalitu prostredia. Zdá sa, že trend smeruje k humanoidným robotom, ktoré by slúžili v domácnosti, či už v kuchyni, alebo pri opatrovaní starých ľudí. Napriek tomu ich prienik do nášho života nie je taký samozrejmý a nedeje sa v takom rozsahu, ako o tom snívajú ľudia v minulom storočí...

Robotika je zvláštna vedecko-technická disciplína v tom, že vďaka literatúre a filmu všetci „vedia“, čo je jej konečným cieľom. Aj laik si totiž dokáže predstaviť, ako má vyzerať dokonalý, človeku podobný robot. Umelci posunuli hranice nášho odboru vpred už v čase, keď ešte neexistovali ani len technické predpoklady pre ich konštrukciu. Dokonca aj slovo robot vzniklo niekoľko desaťročí predtým, ako bol zostrojený prvý priemyselný automat, ktorý sme označili slovom robot.

V polovici minulého storočia sme boli presvedčení, že v budúcnosti, predstavovanej magickým rokom 2000, bude snáď v každej domácnosti humanoidný robot – pomocník, ktorý zvládne všetky domáce práce. Avšak namiesto univerzálnych strojov schopných urobiť čo len jednoduché domáce práce ponúkame ako vrchol techniky nedokonalý robotický vysávač. Tak teda kde sú? Kde sa stala chyba? Aké sú v súčasnosti najväčšie prekážky, ktoré bránia tomu, aby sme naozaj mali robotov, akých nám predstavujú umelci vo svojich fantáziách?

Je ich samozrejme niekoľko. V tejto práci sa pokúsime identifikovať niektoré bariéry, ktoré podľa nášho názoru bránia širšiemu rozmachu robotiky. Pokúsime sa nájsť aj niektoré metódy a prístupy, ktoré by mohli pomôcť prekonať tieto prekážky. Zameriame sa pritom na relatívne úzku oblasť malých mobilných robotov určených pre pedagogiku a výskum.

V druhej časti práce uvidíme praktické využitie navrhovaných prístupov vedúcich k modulárnemu systému školského experimentálneho robota Acrob a niekoľko experimentov v interaktívnom inteligentnom prostredí.

2 Bariéry

Pokúsme sa identifikovať kritické oblasti brániace masívnejšiemu prieniku robotiky najmä do domácností. Popri ich identifikácii sa pokúsime naznačiť aj možné smery ďalšieho vývoja. Tentoraz nebudeme skúmať priemyselné roboty, ale sústredíme sa na roboty do domácnosti, o ktorých ľudstvo sníva od nepamäti. Problémy sme zhrnuli do nasledovných oblastí:

- Energetické zdroje
- Zložitá technológia
- Umelá inteligencia
- Komplexné prostredia
- Psychologické a spoločenské bariéry
- Reálna potreba

Každý z uvedených bodov sme v dizertačnej práci rozviedli podrobnejšie. Takéto analýzy samozrejme robia výskumné tímy po celom svete. Podobnú analýzu spravil napríklad G. Virk [1], ktorý identifikuje ako problém okrem nezrelej technológie a rastúcich aplikačných požiadaviek aj nedostatok štandardov (technické, bezpečnostné, právne,...) a slabú súčinnosť medzi akademickou sférou a priemyslom. Naopak, niektoré iné problémy (energetické zdroje, psychologické bariéry) ignoruje.

Podľa nás je pravdepodobne najviac obmedzujúcim problémom absencia zdroja energie pre mobilného robota porovnateľného s človekom (humanoidného typu a vzhľadu), ktorý by dokázal fungovať v rozumnom čase bez dopĺňania zásob energie.

Ďalším problémom sú nedostatočné kognitívne schopnosti robotov v porovnaní s človekom. Je to spôsobené na jednej strane podcenením skutočných schopností človeka a na druhej strane precenením najmä sľubne sa rozvíjajúcich metód umelej inteligencie.

V tejto práci ukážeme aj to, že klasický pohľad na robota ako na priestorovo ohraňované zariadenie, ktoré v „jednej škatuli“ obsahuje všetko potrebné na svoju činnosť, nemusí byť jediný možný a že rozloženie komponentov robota do priestoru môže priniesť významné úspory a prípadne umožní s existujúcimi technológiami zrealizovať inak neuskutočiteľné riešenia.

3 Možnosti riešenia

Pokúsime sa naznačiť možnosti, ako sa s niektorými problémami z predošlej kapitoly dá vysporiadať s relatívne nízkymi nákladmi.

Za kľúčové princípy, ktoré pomôžu v budúcnosti rozvíjať robotické systémy, považujeme

- modularitu,
- distribúciu zdrojov,
- využívanie interaktívnych prostredí a
- inšpiráciu prírodou.

Modularita Za kľúč k rýchlejšiemu rozvoju výskumných robotických projektov považujeme modularitu [2, 3]. Jej využitím v robotike sa systematicky zaoberá pracovná skupina projektu CLAWAR (CLimbing And Walking Robots) [1]. Na jej pôde vznikol pojem tzv. *interakčného priestoru* [4]. Cieľom úsilia projektu je presvedčiť konštruktérov o istom spôsobe uvažovania, aby už pri počiatočnom návrhu brali do úvahy požiadavky na modularitu. Hoci je na prvý pohľad každý robotický systém diametrálne odlišný, pri podrobnejšom preskúmaní je možné nájsť mnoho podobných črt, na základe ktorých sa dá povedať, že roboty by mohli používať isté spoločné základné komponenty, diely či softvérové moduly, pričom ich funkcia by ostala zachovaná. Výhodou by však bolo jednoznačné skrátenie potrebnej doby vývoja, pretože čas a vývojové prostriedky by boli do istej miery prerozdelené na viacero vývojárskych tímov. Vhodne navrhnuté komponenty je navyše možné znovu použiť v ďalších navrhovaných systémoch a nie je nutné vytvárať celý robotický systém od začiatku.

Distribúcia zdrojov Myšlienka decentralizovaných a distribuovaných riadiacich systémov v automatizácii nie je nová. V praxi sme sa stretli s úlohami, ktoré si decentralizovaný riadiaci systém priam vynútili [5]. Je preto len logické, že aj v oblasti mobilnej robotiky sa pokúšame centrálny riadiaci systém rozložiť a prideliť jednotlivé podúlohy decentralizovaným funkčným jednotkám. Typickým príkladom je inteligentný pohon, ktorý zabezpečuje regulačné slučky rýchlosti, prípadne aj polohy. Výhody decentralizovanej štruktúry oproti centralizovanej sú:

- zjednodušená alokácia výpočtového výkonu,
- zjednodušená konštrukcia,
- zjednodušenie prípadného upgradu systému,
- jednoduchší vyvoj softvéru pre riadenie.

Napriek výhodnám distribuovanej architektúry tu je stále veľké obmedzenie predovšetkým v tom, že energetický zdroj neumožňuje dlhodobú prevádzku takéhoto robota (viac ako približne hodinu).

Ak opustíme myšlienku totálnej autonómnosti, môžeme dislokovať aj zdroje energie, informácií či výpočtového výkonu. Tento problém teda môžeme riešiť tak, že sa budeme snažiť minimalizovať hmotnosť pohyblivej časti robota a všetky komponenty,

ktoré nie sú nevyhnutne mobilné, presunieme mimo telo robota. Výhoda je zrejmá – nižšia hmotnosť znamená aj menšie množstvo energie potrebné na pohyb. Takto získame robota s distribuovanými komponentmi. Niektoré časti budú nepohyblivé a spojenie s pohyblivou časťou bude bezdrôtové.

Pri tejto štruktúre k výhodám decentralizovanej sústavy pribudne zníženie spotreby energie mobilných jednotiek; v podstate bude určovaná len mechanickými aktivitami.

Využívanie interaktívnych prostredí V súvislosti s rozvojom technológií a ich prienikom do nášho každodenného života dochádza k nasýteniu prostredia, ktoré nás obklopuje, mnohými zariadeniami, ktoré sú schopné okrem svojej primárnej funkcie poskytovať služby aj ďalším, pre ktoré pôvodne neboli cielené. Takéto prostredia sa označujú ako inteligentné budovy, alebo všeobecnejšie ako interaktívne inteligentné prostredia či prostredia s *ambientnou inteligenciou*. Nepochybujeme o tom, že takéto prostredie môže veľmi napomôcť efektívnej činnosti mobilného robotického systému v ňom pôsobiacemu. Konkrétny príklad uvedieme pri popise experimentu v časti 6.

Inšpirácia prírodou Okrem už vyššie naznačených prístupov sa okrajovo dotkneme aj ďalšieho rozsiahleho zdroja inšpirácie, ktorým je príroda okolo nás. S každým ďalším pozorovaním, s každým ďalším objavom v tejto oblasti sa môžeme presvedčiť o veľmi kvalitných riešeniach, ktoré sa v prírode nachádzajú a ktoré nám môžu poslúžiť ako návod na riešenie mnohých technických problémov.

Za kľúčové princípy, ktoré pomôžu v budúcnosti rozvíjať robotické disciplíny považujeme modularitu a distribúciu zdrojov robota s využitím prostriedkov ambientnej inteligencie (interaktívne prostredia). Preto sa v nasledujúcej časti pozrieme na možnosti optimalizácie stupňa autonómnosti robota.

4 Optimalizácia stupňa autonómnosti mobilného robota

S cieľom zabezpečiť čo najdlhšiu prevádzkyschopnosť robota je nevyhnutné zamerať sa na optimalizáciu spotreby energie. Okrem vývoja nových a efektívnejších technológií zvyšujúcich účinnosť premeny sa výskum zameriava na optimalizáciu riadiacich algoritmov.

V ďalšom texte sa zameriame na analýzu vplyvu distribúcie komponentov robota a využitia ambientnej inteligencie na jeho spotrebu.

Budeme uvažovať o mobilnom robote, ktorý sa skladá z niekoľkých modulov. *Plne autonómny* robot obsahuje všetky komponenty, ktoré sú potrebné na zabezpečenie jeho správnej funkcie. V závislosti od stupňa redukcie autonómnosti môžeme niektoré moduly aspoň čiastočne umiestniť mimo tela mobilného robota a tým zabezpečiť nielen zníženie jeho hmotnosti, ale aj potrebného elektrického príkonu. Príkladom takého riešenia je napr. robot, ktorý na navigáciu využíva systém GPS, alebo kameru snímajúcu oblasť jeho pohybu v miestnosti zhora. Na druhej strane, takéto rozmiestnenie komponentov môže priniesť zvýšené nároky na prenos dát medzi externými zariadeniami

a s tým súvisiace zvýšenie spotreby. Preto vytvoríme model spotreby energie a vzťahov medzi jednotlivými modulmi mobilného robota.

4.1 Analýza

Keď vezmeme do úvahy využiteľnú energiu E_{BAT} uloženú v batériách a celkový príkon P_{TOT} vyjadrený súčtom spotreby jednotlivých komponentov robota, potom doba prevádzky T_{OP} mobilného robota (funkcia, ktorú chceme maximalizovať) bude

$$T_{OP} = \frac{E_{BAT}}{P_{TOT}} \quad [s; Ws, W] \quad (1)$$

pričom celkový príkon P_{TOT} sa skladá z nasledovných čiastočných príkonov jednotlivých komponentov, ktorých význam je uvedený v tabuľke 1:

$$P_{TOT} = P_{MECH} + P_{SEN} + P_{COM} + P_{uP}. \quad (2)$$

Podrobnejšie sa budeme jednotlivým zložkám venovať v ďalšom texte.

č.	Komponent	Hmotnosť	Príkon \rightarrow	závisí od...
1	Batéria	m_{BAT}	$-E_{BAT}/t$	m_{BAT} [kg]
2	Senzory	m_{SEN}	P_{SEN}	f_{sample} [sps]
3	Komunikácia	m_{COM}	P_{COM}	v_{COM} [bps]
4	Procesor	m_{uP}	P_{uP}	konšt.
5	Konštrukcia	m_{MECH}	P_{MECH}	m_{TOT} [kg]
	Celkom	m_{TOT}	P_{TOT}	

Tabuľka 1: Komponenty robota, ich hmotnosť a príkon.

4.2 Batérie

Zdrojom energie mobilného robota sú batérie. Ich kapacita závisí od použitej technológie a jej merítkom je objemová alebo hmotnostná hustota energie.

Celkové množstvo energie E_{BAT} uložené v nabitých batériách mobilného robota je

$$E_{BAT} = m_{BAT} \cdot c_{BAT}, \quad (3)$$

kde c_{BAT} je hustota energie daná použitou technológiou a m_{BAT} je celková hmotnosť batérií v systéme. Je zrejmé, že množstvo energie, ktoré máme k dispozícii, závisí od počtu batérií, ktoré použijeme. Ak poznáme hmotnosť jednej batérie m_b , môžeme hustotu energie vyjadriť vzťahom

$$c_{BAT} = U_{BAT} \frac{C_B}{m_b}, \quad (4)$$

kde U_{BAT} je jej nominálne napätie a C_B jej nominálna kapacita, daná použitou technológiou a rozmermi. Kapacita batérií C_B sa obvykle udáva v ampérhodinách [Ah], príp. [mAh].

Spotrebu energie mobilného robota určujú jej dve hlavné zložky: elektrická a mechanická. Spotrebičmi elektrickej energie sú prakticky všetky komponenty robota - riadiaci počítač, komunikačný podsystém, senzory aj akčné členy.

4.3 Senzory

Celková spotreba senzorového podsystemu je daná spotrebou jednotlivých senzorov. Spotrebu každého z nich budeme považovať za nemennú v čase, pričom závisieť bude lineárne od počtu meraní za sekundu [6]. Napríklad pre kameru to bude počet snímok za sekundu, pri ultrazvukovom senzore vzdialenosti počet meraní za sekundu a pod. Teda

$$P_s = \sum_i (c_{s0i} + c_{s1i} f_{si}), \quad (5)$$

kde c_{s0i} je kľudová spotreba i -teho snímača a c_{s1i} je jeho spotreba v aktívnom stave (počas merania). Tam, kde potrebné údaje nie sú k dispozícii od výrobcu, je potrebné ich zmerať.

V ďalšej časti budeme analyzovať príkon komunikačnej časti mobilného robota, ktorá však závisí od množstva prenesených údajov. Aby sme vedeli vyhodnotiť množstvo dát, ktoré senzory získajú, zavedieme pre každý z nich aj jeho informačnú mohutnosť N , ktorá bude vyjadrovať počet bitov získaných jedným meraním. Potom pre prenos tohto počtu bitov pri frekvencii merania f_s budeme potrebovať prenosovú kapacitu $N \cdot f_s$ [bit/s].

4.4 Komunikačný subsystém

Plne autonómny mobilný systém pre svoju činnosť nevyžaduje teoreticky žiadne komunikačné rozhranie. Ak sa časť jeho komponentov nachádza v priestore, je nevyhnutné dáta prenášať buď medzi externými senzormi a mobilným počítačom, alebo medzi externým a miestnym počítačom. Príkon $P_B(d)$ potrebný na prenos jedného bitu závisí od vzdialenosti d medzi vysielačom a prijímačom a od vlastností prostredia [7, 8]:

$$P_B(d) = P_{RX} + \beta_{TX} d^\alpha, \quad (6)$$

kde potrebný príkon na prijatie jedného bitu je P_{RX} a príkon potrebný na odvysielanie jedného bitu na vzdialenosť 1 m je β_{TX} . Koeficient α zohľadňuje prenos v rozličných prostrediach [9] (otvorený priestor 1, uzavretá železobetónová budova 6). Uvedený vzťah platí pre bežne používané systémy modulácie, pre komplikovanejšie je potrebné ho upraviť. Napríklad pri prenose QPSK sa prenášajú naraz dva bity, takže potrebné príkony sú nižšie.

Potom na prenesenie N bitov rýchlosťou $N f_s$ budeme potrebovať príkon

$$P_{COM} = \varepsilon N f_s P_B(d), \quad (7)$$

kde $\varepsilon > 1$ je koeficient redundancie prenosu a pokrýva zvýšenú spotrebu potrebnú na prenos bitov zabezpečujúcich komunikáciu (kontrolný súčet, paritné bity a pod.). Niekedy môže byť vytvorenie takéhoto modelu náročné, dá sa však zjednodušiť použitím priemerných hodnôt udávaných výrobcami, prípadne priamo meraním na reálnom systéme.

4.5 Riadiaca jednotka

Spotrebu riadiacej jednotky budeme považovať za konštantnú, pričom môžeme rozlišovať aktívny a pohotovostný stav s rádovo nižšou hodnotou spotreby. Počas plnenia

úlohy robot však v pohotovostnom režime nebude. Bežný mikropočítač totiž nerozlišuje, aké inštrukcie vykonáva, aj v stave, keď nespracováva žiadne informácie zo snímačov, pracuje v normálnom režime a čaká na nové údaje.

Ako ukázali autori v [10], takýto predpoklad je pre naše účely vyhovujúci, preto

$$P_{uP} = P_{uP0}, \quad (8)$$

kde P_{uP0} je konštantný trvalý príkon palubného mikropočítača, ktorý nezávisí od množstva vykonaných operácií.

Hmotnosť riadiacej jednotky m_{uP} považujeme takisto za konštantnú.

4.6 Mechanická zložka

Túto časť príkonu spotrebujeme na pohyb robota v priestore. Pohyb robota zabezpečujú motory, ktoré premieňajú elektrickú energiu na mechanickú s istou účinnosťou η .

Príkon, potrebný pre pohyb mobilného robota s celkovou hmotnosťou m_{TOT} rýchlosťou v a zrýchlením a je

$$P_M = P_s + m_{TOT}(a + \mu g)v, \quad (9)$$

kde P_M je pohybový príkon, μ je koeficient trenia a g je gravitačné zrýchlenie. Celkové straty P_s závisia od strát vo vinutiach motora, mechanických stratách v prevodoch a ložiskách, ako aj stratách vírivými prúdmi. Straty rastú s rastúcou rýchlosťou, ale závislosť nie je lineárna. Pre konkrétnu úlohu, ktorú mobilný robot plní, budeme považovať celkový požadovaný príkon za konštantný, pričom aj straty P_s budeme považovať za konštantné.

Pre daný mobilný robot bude premena elektrickej energie na mechanickú realizovaná vždy s istou účinnosťou, ktorej hodnota je menšia (často oveľa) ako 1. Potrebný príkon potom bude

$$P_{MECH} = \frac{P_M}{\eta} \quad (10)$$

- účinnosť spočiatku rastie so stúpajúcou rýchlosťou a potom klesá pre vyššie výkonové straty [10].

Podstatný vplyv na celkový požadovaný príkon má samozrejme hmotnosť robota. Celková hmotnosť robota m závisí od množstva zariadení, ktoré robot nesie:

$$m_{TOT} = m_{BAT} + m_{MECH} + \lambda m_{SEN} + m_{COM} + m_{uP}. \quad (11)$$

4.7 Stupeň autonómnosti

Keďže v našej analýze chceme zistiť vplyv rozmiestnenia senzorov, resp. ich premiestnenia mimo tela robota, zavedieme parameter $\lambda \in \langle 0, 1 \rangle$, pričom 0 znamená, že mobilný robot nenesie vôbec žiadne senzory a 1 znamená, že robot obsahuje všetky senzory potrebné pre svoju činnosť.

Týmto koeficientom λ môžeme vynásobiť potrebný elektrický príkon pre senzory

$$P_{SEN} = \lambda \sum_i (c_{s0i} + c_{s1i} f_{si}), \quad (12)$$

a v rovnakej miere sa zmení aj hmotnosť senzorickej časti, ktorú môžeme vyjadriť vzťahom λm_{SEN} . Pre robot celkom bez sensorov teda nebude ich hmotnosť vystupovať v celkovom súčte. Táto položka však pravdepodobne aj tak bude mať len zanedbateľný vplyv na výsledok.

V prípade zmeny počtu sensorov sa zmení aj potrebná prenosová kapacita, ktorej veľkosť bude λN .

Uvedomujeme si, že v praxi nemôže hodnota koeficientu λ nadobúdať ľubovoľné hodnoty, keďže pridanie, resp. ubranie senzora z robota je diskrétny proces. Napriek tomu môže táto hodnota slúžiť ako akési vodidlo pri návrhu robota.

V závislosti od stupňa autonómnosti robota sa bude meniť aj množstvo dát, ktoré musíme preniesť. V prípade úplnej autonómnosti ($\lambda = 1$) robot teoreticky nepotrebuje vôbec komunikovať a potrebný príkon vysielacej časti je $(1 - \lambda)P_{COM}$. Naopak, v druhom extrémnom prípade, keď robot neobsahuje žiadne senzory ($\lambda = 0$), je objem prenášaných dát z robota nulový, ale robot musí prijímať isté množstvo príkazov na zabezpečenie pohybu, takže príkon je $\lambda P_{COM} + P_{RX}$. V prípade, že robot síce obsahuje senzory, ale informáciu z nich len odvysiela a nespracuje ju na palube, sa musí prenášať celý objem dát, takže potrebný príkon je maximálny. Vo všeobecnosti je príkon komunikačnej časti robota nejakou funkciou $f(\lambda)$, pre ktorú platí

$$1 \geq f(\lambda) \geq 0 \quad \forall \lambda \in \langle 0, 1 \rangle \quad (13)$$

a pre príkon komunikačného pod systému potom platí

$$P_{COM} = f(\lambda) N f_s P_B(d), \quad (14)$$

a po dosadení z (6)

$$P_{COM} = f(\lambda) \varepsilon N f_s (P_{RX} + \beta_{TX} d^\alpha) \quad (15)$$

Na rozdiel od príkonu, na hmotnosť komunikačnej jednotky koeficient λ nemá veľký vplyv, pretože nezávisí od množstva prenesených informácií. Jediný prípad, kedy je $\lambda = 1$, a teda $m_{COM} = 0$ môžeme zanedbať, pretože hmotnosť komunikačnej jednotky tvorí len zlomok hmotnosti celého mobilného systému.

Od stupňa autonómnosti robota závisí aj množstvo výpočtového výkonu alokovaného na mobilnom podvozku. Platí priama úmera, teda čím viac sensorov robot obsahuje, tým viac výpočtového výkonu musí venovať spracovaniu signálov. Ak bude robot obsahovať málo výpočtového výkonu priamo na podvozku, bude potrebné o to viac dát preniesť bezdrôtovo. Podrobnejšia analýza by zrejme odhalila aj zložitejšie ako lineárne závislosti.

Pre danú konfiguráciu mobilného robota však zmena počtu sensorov neprinesie úsporu príkonu, ktorý považujeme za konštantný (viď (8)).

4.8 Optimalizácia doby prevádzky

Pre každý robot je vytvorenie účelovej funkcie individuálne, nakoľko máme vždy k dispozícii rôzne údaje. Niekedy to budú len odhadované hodnoty z nejakého modelu, inokedy to budú empirické konštanty získané meraním a experimentmi. V praxi sa vždy môžu vyskytnúť aj iné obmedzenia, ktoré zmenšia voľnosť pri tvorbe optimalizačného modelu. Nakoniec však vždy dosiahneme účelovú funkciu, ktorá konštruktérovi pomôže optimálne rozložiť podiel sensorov na mobilnom robote.

Našou snahou je maximalizovať dobu činnosti robota, ktorá je daná podielom energie a príkonu (1). Keďže čitateľ aj menovateľ v zlomku (1) je vždy kladný, musíme minimalizovať hodnotu menovateľa, t.j. spotrebu robota P_{TOT} .

Celkový príkon bude po dosadení z horeuvedených vzťahov

$$P_{TOT} = P_{MECH} + P_{SEN} + P_{COM} + P_{uP} \quad (16)$$

Po dosadení zo vzťahov uvedených vyššie

$$P_{TOT} = \frac{1}{\eta}(P_s + m(a + \mu g)v) + \lambda \sum_i (c_{s0i} + c_{s1i}f_{si}) + f(\lambda)\varepsilon N f_s(P_{RX} + \beta_{TX}d^\alpha) + P_{uP0} \quad (17)$$

a po zlúčení všetkých konštantných členov do všeobecných konštant c_i

$$P_{TOT} = c_1 + \lambda c_2 + f(\lambda)c_3 + c_4. \quad (18)$$

Potom minimum podľa premennej λ nájdeme ako

$$\frac{dP_{TOT}}{d\lambda} = c_2 + c_3 \frac{df(\lambda)}{\lambda} = 0 \quad (19)$$

teda

$$\frac{df(\lambda)}{\lambda} = -\frac{c_2}{c_3} \quad (20)$$

Takto nájdená optimálna hodnota λ sa môže využiť pri konštrukčnom návrhu konkrétneho robota. V dizertačnej práci sme ďalej ukázali výsledok takejto optimalizácie pre závislosť $f(\lambda)$ danú vzťahom

$$f(\lambda) = \lambda(1 - \lambda). \quad (21)$$

5 Modulárny robotický systém Acrob

Za kľúčový princíp, ktorý je potrebné pri návrhu robotických systémov používať, považujeme modularitu. Preto sa v tejto časti budeme zaoberať našimi skúsenosťami z návrhu školského modulárneho robotického systému Acrob.

Robotický systém Acrob bol vytvorený na mieru požiadavkám výučby na predmete Robotika, ako aj rôznych bakalárskych a diplomových projektov. V nasledujúcom texte uvedieme len stručný popis tejto platformy, ktorú sme podrobne popísali v článkoch [1] a [2]. Celá technická dokumentácia k robotu je šírená pod licenciou open source a open hardware a je voľne prístupná¹.

Naším cieľom bolo navrhnuť otvorený robotický systém, ktorý umožní rýchlo a jednoducho predviesť študentom odboru Robotika základné princípy používané v mobilnej robotike. Okrem toho sme chceli študentom poskytnúť univerzálnu platformu na riešenie semestrálnych prác a záverečných projektov. Chceli sme poskytnúť vhodné vývojové prostriedky aj pre čoraz vyšší počet študentov, ktorí sa zúčastňujú rôznych robotických súťaží. Systém by mal byť dostatočne jednoduchý, aby ho mohli používať aj nadaní študenti stredných škôl.

Vo vývojovej fáze sa často požiadavky priebežne upravujú, skúša sa niekoľko rôznych koncepcií, mení sa konštrukcia, skúmajú sa vlastnosti navrhnutých variánt. Preto je potrebný systém, ktorý umožní kombinovať veľké množstvo komponentov, jednoducho zmeniť už navrhnuté časti a v neposlednej miere ich aj rýchlo a jednoducho programovať.

Robotický systém budeme navrhovať ako tzv. *hybridný*, na rozdiel od tzv. *homogénneho*, kedy je robot tvorený prakticky identickými modulmi [13], [14].

Základom, z ktorého sme vychádzali, je existujúca, komerčne dostupná platforma Boe-Bot firmy Parallax, Inc [15]. S robotom Boe-Bot sme mali výborné skúsenosti z bežnej výučby aj z letných škôl robotiky. Prakticky jedinou, ale podstatnou výhradou bola jeho riadiaca jednotka s procesorom BasicStamp II. Už z jeho názvu vyplýva, že sa programuje v jazyku Basic, ktorý

- nepozná užívateľské funkcie,
- neumožňuje používať knižnice,
- neumožňuje priamy prístup k perifériám a
- neumožňuje používať prerušenia.

Ani naši študenti, ktorí s robotom pracovali, tento programovací jazyk bežne neovládajú. Preto sme hľadali náhradu v podobe riadiacej jednotky, ktorá by v maximálnej možnej miere bola kompatibilná s pôvodnou jednotkou, ale umožnila by programovať robota v jazyku C, resp. C++, ktorý sa vyučuje v základnom kurze a študenti ho bežne používajú.

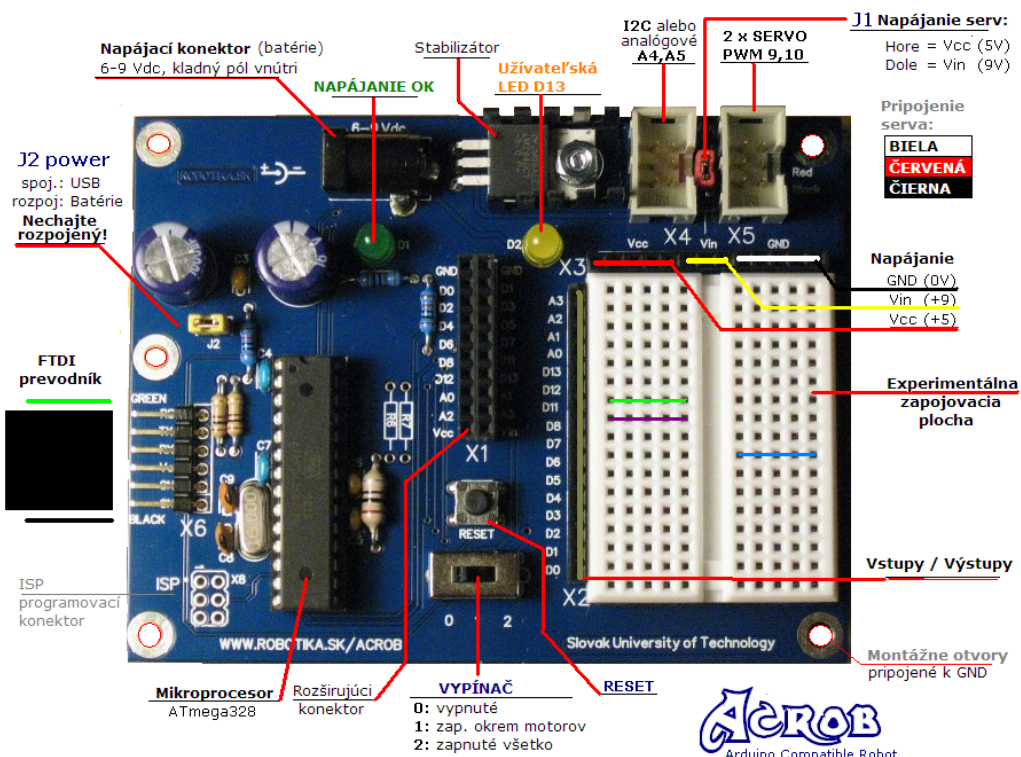
V poslednej dobe sa okolo RISC platformy procesorov Atmel AVR vytvorilo vývojové prostredie Arduino², ktoré zahŕňa nielen otvorené hardvérové platformy s procesormi ATmega88, 168 a 328, ale aj ucelené vývojové prostredie. Komunita, ktorá pracuje na vývoji, dopĺňa nové a nové knižnice a vytvára tak hodnotný a populárny

¹<http://robotika.sk/acrob>

²<http://arduino.cc>

projekt. Jeho popularita neuveriteľne narastá, a tak bolo logické, že sme pri návrhu nášho systému uvažovali aj o možnosti využitia potenciálu tohoto projektu.

Výsledkom je robotický systém Acrob (t.j. Arduino Compatible Robotic Board). Jeho srdcom je nová riadiaca jednotka, ktorá po výmene pôvodnej jednotky Board of Education umožňuje programovať robota v prostredí Arduino s využitím všetkých jemu dostupných knižníc. Programovanie v prostredí Arduino je objektové, využíva knižnice a vysokú úroveň abstrakcie, takže potenciálny užívateľ prakticky nemusí poznať detaily architektúry daného procesora. Po doplnení o niekoľko existujúcich i novo vyvinutých modulov máme k dispozícii dostatočne univerzálny systém využívaný na cvičeniach i v rozličných projektoch, ako ukážeme na záver.



Obr. 1: Riadiaca doska robota Acrob.

Vzhľadom na to, že sme pri návrhu riadiacej jednotky Acrob zachovali nielen mechanické rozmery dosky, ale aj rozmiestnenie konektorov, máme okamžite k dispozícii všetky existujúce periférie a doplnky pre pôvodný robot Boe-Bot firmy Parallax. Podstatne sme však pri návrhu zmenili obvody komunikačného rozhrania. Dôvody ako aj navrhnuté riešenie je popísané ďalej.

K systému je možné pripojiť veľké množstvo bežne dostupných periférií a doplnili sme ho aj o niekoľko pôvodných modulov.

5.1 Metodika návrhu

Pri návrhu celej platformy i jednotlivých modulov vychádzame z metodiky opísanej G. Wirkom v rámci projektu CLAWARM [1, 4]. Funkčná dekompozícia vychádza z klasického delenia riadiaceho systému na senzorské moduly, akčné členy a samotné riadiace jednotky.

Pri návrhu sme sa pridržovali tejto metodiky všade tam, kde to bolo možné, využívali sme najmä koncepciu interakčného priestoru. Okrem toho sme sa snažili všade tam, kde to bolo možné, uprednostniť niektorý už existujúci, t.j. komerčne dostupný (COTS) modul pred vlastným návrhom. Cieľom nebolo navrhnúť desiatky nových modulov pre robotiku, ale práve naopak, pokúsiť sa integrovať čo najviac už existujúcich komponentov a ponúknuť tak užívateľovi širokú škálu prostriedkov pre návrh mobilných robotických systémov.

5.1.1 Interakčný priestor

Aby boli navrhované moduly dostatočne využiteľné a boli nielen univerzálne, ale aj vzájomne kompatibilné, musíme pri návrhu postupovať podľa jednotných návrhových pravidiel. My sme využili návrh pomocou interakčného priestoru. Ním môžeme definovať vonkajšie správanie každého z modulov.

Opíšeme jednotlivé metódy interakcie, ktoré vyplývajú z požiadaviek pre pohodlnú spoluprácu modulov.

Mechanická Spočiatku bola pri návrhu snaha dosiahnuť maximálnu možnú kompatibilitu s robotom Boe-Bot firmy Parallax. Postupne sa však ukázalo, že požiadavky konštruktérov nových robotických systémov nedokáže pôvodná mechanická konštrukcia uspokojiť. V niekoľkých študentmi realizovaných systémoch boli použité dieliky z mechanickej stavebnice Merkur, inde zase Lego Mindstorms. Preto sme postupne navrhli aj niekoľko rozširujúcich prvkov, ktoré umožňujú aj integráciu s týmito populárnymi stavebnicami.

Energetická Zvolili sme koncepciu, pri ktorej bude napájanie priamo privedené len na jednu riadiacu dosku, ktorá bude obsahovať vypínač a stabilizátor napätia. Zvyšné moduly nemusia byť funkcie schopné, ak nie je napájaná riadiaca doska, preto budú napájané sprostredkované. Ako zdroj napätia sme zvolili batérie, ktoré umožňujú autonómnou prevádzku. Okrem toho je možné systém napájať aj zo siete, čím sa zjednodušuje vývoj systému a práca študentov cez vyučovanie.

Komunikačná Špecifikácia CLAWARM rozlišuje v interakčnom priestore pri komunikačnej úrovni okrem bežnej výmeny informácií aj špeciálnu interakciu, ktorá umožňuje aktualizovať vstavaný firmvér prostredníctvom tzv. bootloADERu.

Systém Arduino takýto bootloADER, ktorý umožňuje aktualizovať užívateľský program, už obsahuje. Cez toto rozhranie je možné nahráť vlastný program bez nutnosti použitia špecializovaného hardvérového programátora. Moduly teda musia byť vybavené sériovým rozhraním pre komunikáciu s Acrob, Arduino alebo podobným systémom.

Treba priznať, že táto interakcia nie je riešená optimálne. Vo vzájomnom protiklade tu stoja technické požiadavky na robustnosť komunikačného rozhrania a nedostatok existujúcich COTS modulov s takýmto rozhraním. Preto sme tu spravili čiastočný ústupok, komunikačné rozhranie je ponechané vo forme sériovej linky s TTL úrovňou a umožňuje okrem modulov pripojiteľných priamo aj pripojenie niekoľkých typov komunikačných prevodníkov.

Analógová Ako sme už uviedli, vzhľadom na veľkú pravdepodobnosť rušenia analógových signálov výkonovými časťami robotického systému nepovažujeme tento interakčný priestor za vhodný a odporúčame sa mu vyhnúť. Riadiaci systém však umožňuje využívať pre jednoduché aplikácie dva analógové kanály kompatibilné s niekoľkými druhmi senzorov, ktoré opíšeme ďalej. Okrem toho je k dispozícii niekoľko ďalších, voľne konfigurovateľných analógových kanálov.

Tam, kde je to možné, sa analógové signály z jednotlivých snímačov spracovávajú priamo na inteligentnom module a ďalej sa posielajú ako digitálna informácia.

Digitálna Podobne ako pre analógový interakčný priestor, aj tu sme síce umožnili najmä z dôvodov kompatibility využívať niekoľko digitálnych rozhraní, ale aj tak odporúčame, tam, kde je to možné, informáciu predspracovať a presunúť ju do komunikačného interakčného priestoru.

Naším zámerom je prenášať informácie sériovou linkou, teda nie je nutné v interakčnom priestore zabezpečiť priestor pre špecifické digitálne signály. Výnimkou je signál RESET. V prípade zacyklenia alebo inej poruchy niektorého inteligentného modulu totiž zlyhá aj sériová komunikácia. Univerzálny prepojavací konektor systému Acrob tento signál obsahuje, čím získame možnosť vzdialene inicializovať procesor riadiacou jednotkou alebo užívateľom.

Interakcia s okolím Robotické systémy konštruované systémom Acrob samozrejme budú interagovať s okolím, preto je potrebné zaoberať sa aj týmto interakčným priestorom. Konkrétne požiadavky sú však špecifické pre každý návrh, a preto je ťažké ich zovšeobecniť. Zaujímavá je predovšetkým interakcia s interaktívnym inteligentným prostredím. Preto sme tento problém skúmali v kapitole 6, kde robotický systém interagoval s existujúcim laboratórnym prostredím.

5.1.2 Distribuovaná inteligencia

V navrhovanom systéme Acrob sa budeme snažiť presúvať výpočtový výkon vždy čo najbližšie k systému, ktorý ho bude využívať. Už vopred môžeme povedať, že v systéme sa bude nachádzať niekoľko autonómnych riadiacich systémov. Celkom isto to budú rýchlostné servosystémy v každej pohonnej jednotke.

Spomedzi často používaných snímačov spomeňme ultrazvukový senzor na meranie vzdialenosti, ktorý je tiež vybavený samostatnou riadiacou jednotkou a na svojom výstupe už poskytuje „očistený“ údaj.

Aj komunikačné rozhranie – či už je to vývojové USB rozhranie, alebo prevádzkové rozhranie Bluetooth – je riadené samostatnou riadiacou jednotkou, ktorá implementuje celý požadovaný protokol a užívateľovi poskytuje už len transparentný komunikačný kanál.

Najvyššie v hierarchii bude stáť riadiaca jednotka celého robota, ktorá implementuje požadovaný algoritmus správania robota a využíva transparentné dátové toky, ktoré jej poskytujú podriadené jednotky.

Bol navrhnutý inteligentný modul, ktorý má na starosti výhradne senzorový podsystem robota s cieľom nielen odbremeniť centrálnu jednotku, ale aj zjednodušiť návrh riadiaceho algoritmu robota.

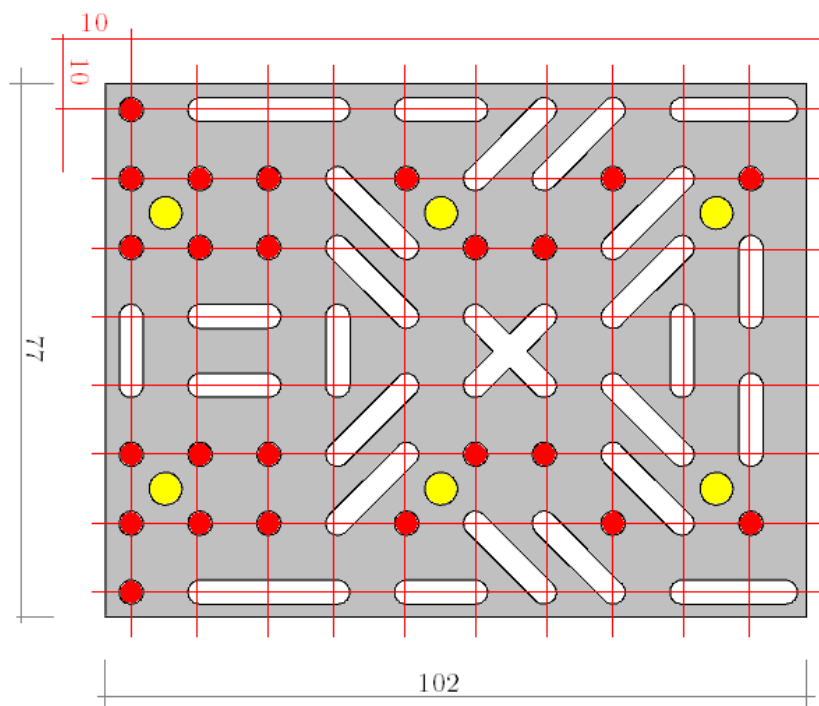
Teraz sa pozrieme na jednotlivé funkčné podsystémy robotického systému Acrob.

5.2 Acrob: mechanická úroveň

Ako sme už spomenuli, spočiatku sme nemali ambície venovať sa univerzálnemu mechanickému návrhu, bola len snaha dosiahnuť maximálnu možnú kompatibilitu s robotom Boe-Bot firmy Parallax. Postupne však vznikla potreba navrhnuť aj niekoľko rozširujúcich prvkov, ktoré by umožnili integráciu s populárnymi konštrukčnými stavebnicami.

V spolupráci s tradičnou českou firmou Merkurtoys, ktorá vyrába stavebnice Merkur, sme sa pokúsili využiť jej nové komponenty navrhnuté pre robotiku. Výhoda tejto stavebnice je prijateľná mechanická tuhosť dielov, jednotný raster 10×10 mm a široká škála dostupných dielikov. Výrobca v poslednej dobe vychádza v ústrety konštruktérom ponukou jednotlivých dielikov (netreba kupovať celú stavebnicu), aj rozšírenou ponukou dielov navrhnutých špeciálne pre robotiku.

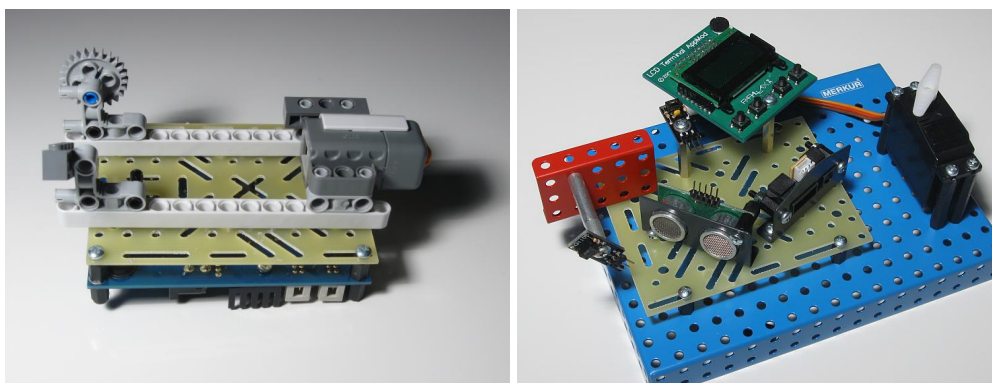
Keďže ani inovovaná ponuka nám nevyhovovala a neumožnila poskladať z takýchto komponentov napr. vhodný podvozok, navrhli sme univerzálnu plastovú podložku (obr. 2), ktorá obsahuje dostatočné množstvo montážnych otvorov, takže bez problémov môžeme kombinovať riadiacu jednotku s ostatnými dielmi stavebnice Merkur.



Obr. 2: Návrh univerzálnej montážnej dosky pre kombináciu so stavebnicami Merkur (červený raster) aj Lego Technics (žltý raster).

Montážne otvory sú v rastri 10×10 mm, takže kombinácia prvkov je bezproblémová. Postupne sme pridali aj niekoľko oválnych otvorov, ktoré umožnia pripojiť napr. dosky plošných spojov, ktorých rozmery sú mimo raster, prípadne môžeme upevňovať komponenty v iných ako pravých uhloch. Napokon sme pridali aj niekoľko otvorov v rastri stavebnice Lego Technics, takže teraz je možné všetky komponenty takmer ľubovoľne kombinovať.

K základnej doske sme navrhli aj niekoľko pomocných dielov pre montáž servomotorov a senzorov do systému.



Obr. 3: Kombinácia systému Acrob so stavebnicami Lego (vľavo) a Merkur (vpravo).

5.3 Acrob: komunikačné rozhranie

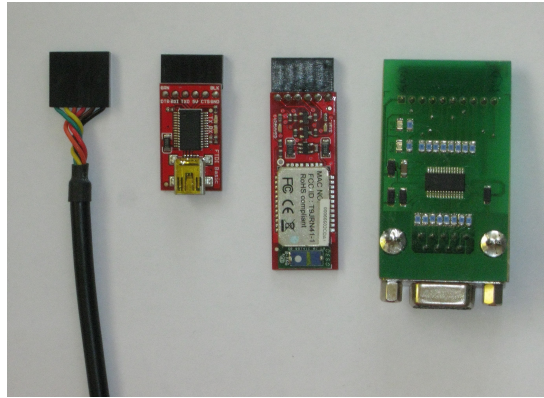
Komunikačné rozhranie robota Acrob je navrhnuté s dôrazom na modularitu. Umožňuje riadiacej jednotke komunikovať (a v režime bootload aj modifikovať riadiaci program) prostredníctvom niekoľkých komunikačných rozhraní: sériové TTL rozhranie pre komunikáciu s iným procesorom, bežná RS-232, USB alebo Bluetooth. Špeciálne navrhnutý modul umožní realizovať cez to isté rozhranie aj komunikáciu s užívateľom cez lokálne HMI (terminál – klávesnica a displej).

Na pôvodnej doske Board Of Education, z ktorej sme pri návrhu vychádzali, boli integrované priamo prevodníky a konektory rozhrania RS-232, resp. USB v novej verzii. My sme sa rozhodli prevodníky na dosku neintegrovat', ale využiť vhodné dostupné komerčné moduly (COTS). Pri použití modulov FTDI Breakout alebo Bluetooth Mate firmy Sparkfun získavame riadiacu jednotku s pripojením USB alebo BT. Ďalej sme navrhli pôvodný prevodník pre rozhranie RS-232 a odskúšali sme aj možnosť pripojenia modulu OpenLog, kedy sa všetka komunikácia (napr. telemetria) zapisuje na vstavanú polovodičovú pamäť – SD kartu. Považujeme tento príklad za úspešnú realizáciu modulárnej koncepcie, po ktorej mnohí konštruktéri tak volajú.

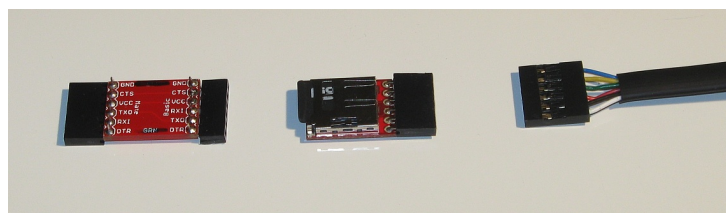
Univerzálny 6-pinový komunikačný a napájací konektor umožňuje aj priame prepojenie dvoch jednotiek križeným káblom, pričom komunikácia prebieha v úrovniach TTL.

Považujeme za vhodné takýmto rozhraním vybaviť aj novo vyvíjané moduly, osvedčilo sa to v moduloch HMI aj H-mostu. Takéto moduly je potom možné v priebehu vývoja pripojiť priamo k PC bez použitia akejkoľvek riadiacej jednotky, alebo k riadiacej doske Acrob, ktorá by ich ovládala.

Ďalšou možnosťou komunikácie riadiacej jednotky Acrob s perifériami je zbernica I²C. Jej využitie v malej mobilnej robotike je značné [16], napriek skutočnosti, že ide o zbernicu vytvorenú na prepojenie podsystémov v zariadeniach spotrebnej elektroniky na pomerne krátke vzdialenosti a do relatívne zarušeného prostredia mobilného robota je nevhodná.



Obr. 4: Rozličné komunikačné moduly robota Acrob. Zľava: FTDI USB kábel, moduly USB, Bluetooth a RS-232.



Obr. 5: Ďalšie možnosti využitia komunikačného rozhrania – modul prekríženia pre dve dosky Acrob, datalogger OpenLog a kríženy kábel.

Pripájanie zariadení na túto zbernicu vyžaduje 4 vodiče, okrem dvoch komunikačných aj zem a napájanie. Náš systém Acrob umožňuje vytvoriť softvérovú implementáciu tejto zbernice na ľubovoľných dvoch I/O pinoch procesora, alebo využiť vstavanú perifériu TWI prostredníctvom konektora X4, pričom je nevyhnutné na doske osadiť tzv. pull-up rezistory, ktoré zabezpečia definované napätie na zbernici. Bez týchto rezistorov (prípadne len s využitím zabudovaných pull-up tranzistorov procesora ATmega328P) je komunikácia na vyšších prenosových rýchlostiach nespoľahlivá, pretože signál je deformovaný.

V prípade, že by sa systém Acrob mal využívať aj v rozľahlejších systémoch s požiadavkami na vyššiu odolnosť voči rušeniu, mal by sa využiť prevodník rozhrania CAN, ale týmto smerom sme zatiaľ nedosiahli žiadne pozitívne výsledky. Problémom je malá ponuka rozširujúcich modulov a už spomínaná neexistencia vhodnej aplikačnej vrstvy.

5.4 Acrob: rozhranie HMI

Pre interakciu s človekom obsahuje riadiaca jednotka systému Acrob len dve indikačné LED diódy. Prvá indikuje prítomnosť napájacieho napätia, funkcia druhej je používateľsky programovateľná. V prípade, že to aplikácia vyžaduje, je samozrejme možné ďalšie prvky doplniť. Najjednoduchším riešením je využiť existujúci LCD displej so 4 tlačidlami od firmy Parallax, ktorý sa dá priamo pripojiť cez konektor X1 a mechanicky upevniť dištančným stĺpikom. Toto riešenie používame na cvičeniach, ale spotrebuje príliš veľa vstupno-výstupných pinov procesora.

Textový výstup Preto sme vyvinuli ďalší modul, ktorý rozšíri možnosti tejto riadiacej jednotky - je ním modul inteligentného LCD displeja, ktorý bude kompatibilný s modulmi pre komunikačné rozhrania, takže umožní telemetrické údaje z robota buď prenášať existujúcimi rozhraniami (už spomínané USB, BT, RS-232), ale aj ich lokálne zobrazenie priamo na LCD displeji. Modul je kompatibilný s terminálmi VT-100, takže bez akéhokoľvek zásahu v bežiacom programe môžeme sledovať výpisy na termináli PC alebo na termináli priamo na robote (samozrejme s uvažovaním všetkých obmedzení, ktoré má LCD terminál s kapacitou napr. 2x16 alebo 4x20 znakov).

Modul displeja je možné využiť buď s úplným využitím 6-pinového rozhrania, alebo len s minimálnou, 3-pinovou verziou, ktorá využíva jediný vodič na prenos informácie smerom z mikroprocesora do displeja. Je síce pravda, že takýto modul neobsahuje spätnú väzbu a môže sa stať, že niektoré dáta sa na displej nezapíšu správne, avšak vhodným časovaním tomu vieme predísť.

Jednotka bola navrhnutá tak, aby obsahla čo najviac bežne dostupných LCD modulov, ktoré sú síce osadené rovnakým LCD driverom, ale jeho zapojenie sa líši niekedy rozmiestnením pinov a najmä významom pinov pre ovládanie podsvietenia.

Rečový výstup Ďalším vytvoreným modulom je prevodník ASCII textu na hovorenú reč vystavaný okolo modulu Emic Text-To-Speech³. Prevodník je síce založený na čipe, ktorý je určený predovšetkým anglicky hovoriacim zákazníkom, ale aj tak je rozumne využiteľný aj v našej jazykovej oblasti. V základnom režime konvertuje postupnosť ASCII znakov na text, preto sme ho doplnili o sériové rozhranie podobne ako pri LCD displeji popisovanom vyššie. Procesor ATmega328 filtruje prichádzajúce znaky tak, že riadiace kódy a ESC-sekvencie sa vo výslednom texte neobjavia, inak by modul „prečítal“ aj tie.

5.5 Acrob: akčné členy

Aj pri pripájaní akčných členov sme kládli dôraz na modularitu. K riadiacej jednotke je možné pripojiť komerčné polohové a rýchlostné servopohony v celej škále rozmerov a výkonov, ako aj jednosmerných pohonov so špeciálnou riadiacou jednotkou.

Mechanické a elektrické pripojenie pohonov sme konštrukčne prevzali z pôvodnej dosky firmy Parallax. Trojpinový konektor umožňuje pripojiť tzv. rýchlostné servopohony, ktoré poháňajú mobilný robot.

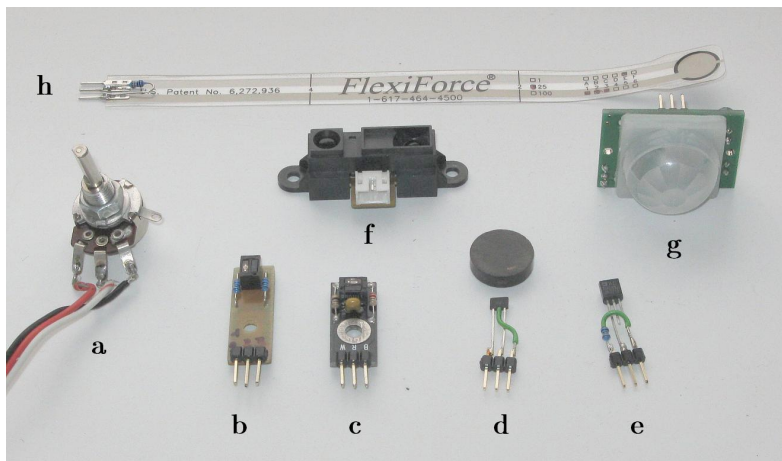
Okrem polohového servomechanizmu je k dispozícii elektricky a mechanicky zhodný rýchlostný servosystém. Existuje dokonca modul riadenia jednosmerného motora do 25 A, ktorý využíva rovnaké elektrické a mechanické rozhranie na pripojenie [17]. Okrem týchto bežných modulov existuje aj servo s lineárnym posunom (Firgelli L-12).

Existujú dokonca jednoduché chápadlá a iné mechatronické konštrukcie s týmto typom pohonov.

³<http://www.grandideastudio.com/portfolio/emic-text-to-speech-module/>

5.6 Acrob: senzory

K riadiacej jednotke Acrob je možné priamo bez akejkoľvek úpravy pripojiť mnoho typov senzorov s analógovým alebo digitálnym výstupným signálom. Niektoré z tých, ktoré sme vyskúšali, sú uvedené na obrázku 6. Využili sme pritom schopnosť procesora využívať ten istý pin ako analógový aj digitálny vstup.



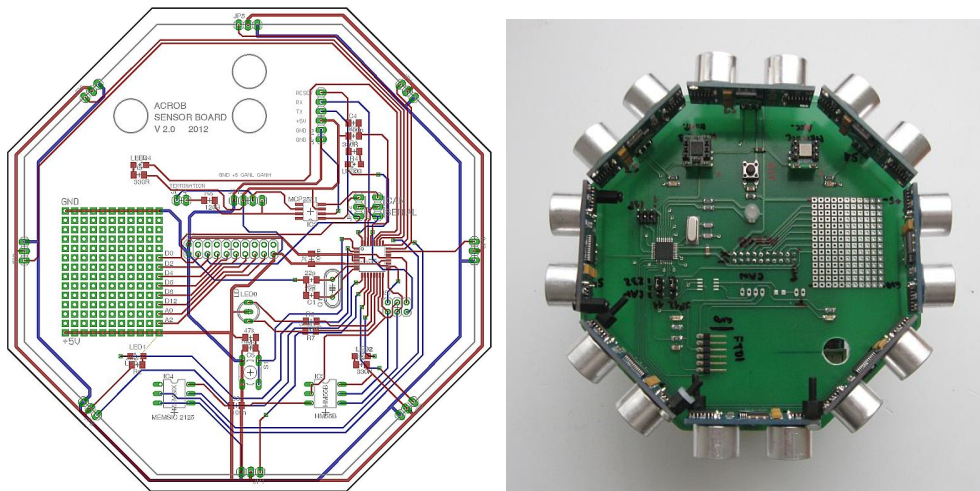
Obr. 6: Rozličné senzory pre robot Acrob: a – potenciometrický snímač uhlovej polohy, b, c – infračervené snímače polohy, d – snímač intenzity magnetického poľa, e – snímač teploty, f – triangulačný snímač vzdialenosti, g – PIR snímač, h – snímač tlaku/sily.

Pre komplikovanejšie senzory sme využili možnosť softvérovej implementácie sériového komunikačného rozhrania pre pripojenie senzoru farby, meranie času pre senzor vzdialenosti a implementáciu 1-wire zbernice pre snímač teploty.

Okrem toho sme v rámci diplomovej práce [18] vytvorili aj špecializovaný modul senzorov, ktorý sa pripája priamo na systémový konektor X1 kompatibilný s modulmi firmy Parallax. Okrem jednotky Acrob je teda modul využiteľný aj pre pôvodný procesor BasicStamp II alebo multiprocesorový systém Propeller firmy Parallax. Modul obsahuje samostatný procesor pre riadenie merania až ôsmimi ultrazvukovými snímačmi PING. Nie je nevyhnutné použiť všetkých 8 snímačov, často stačia len predné tri. Súbor senzorov je možné rošíriť ešte o snímač intenzity magnetického poľa (kompas) a akcelerometer. Údaje z kompasu je samozrejme nutné brať len orientačne, keďže magnetické pole je ovplyvnené okolitými súčiastkami a prípadne aj blízkym vyžarovaním z elektromotorov. V prípade náročnejších požiadaviek je potrebné snímač umiestniť na vyvýšené miesto, vzdialené od zdrojov elektromagnetického rušenia.

5.7 Softvérová modularita

Vyvíjané programy sa nahrávajú pomocou zabudovaného bootloadera, takže nie je potrebné žiadne nákladné vývojové prostredie. Napriek tomu však stále existuje aj náročnejšia možnosť, t.j. programovať riadiacu jednotku v jazyku C (kompilátor avr-gcc) napríklad v prostredí AVR studio, pričom máme k dispozícii nielen simulátor procesora, ale s využitím vhodného nástroja (AVR Dragon) dokonca možnosť on-line debugovania priamo v systéme. Je samozrejme možné písať programy aj priamo v as-



Obr. 7: Navrhnutý senzorový modul a jeho realizácia [18].

sembleri. V posledných dvoch prípadoch máme úplný prístup ku všetkým súčastiam procesora a je možné ho ľubovoľne konfigurovať.

Výhoda kompatibility s prostredím Arduino je zrejmá - poskytuje začiatočníkom nielen vítané oddelenie od hardvérovej implementácie, ale okamžite mu ponúka nepreberné množstvo vzorových aplikácií, knižníc a diskusné fóra, napr. priamo na stránkach <http://arduino.cc>.

5.8 Modularita v praxi

V súčasnej dobe je systém Acrob možné doplniť a rozšíriť o celý rad modulov, pričom k dispozícii je niekoľko bežne dostupných komerčných prvkov ako aj na mieru vytvorené celkom nové moduly.

Tieto prvky je samozrejme možné využívať aj mimo oblasť robotiky. Napr. spojením LCD modulu s USB prevodníkom získame LCD displej jednoducho pripojiteľný k bežnému PC. Môže zobrazovať napríklad stav procesora, množstvo voľnej pamäte a pod⁴.

Z uvedených modulov je možné zostaviť niektoré užitočné kombinácie, napríklad pomocou inteligentného LCD modulu a Bluetooth modulu získame po doplnení zdrojom energie prenosný LCD zobrazovací modul, ktorý môže zobrazovať meniace sa údaje prakticky kdekoľvek v dosahu rozhrania Bluetooth (10 – 100 m).

Pripojením modulu dataloggera k senzorovej jednotke zasa vznikne autonómna meracia jednotka so zápisom dát na SD kartu využiteľná napríklad ako bezpečnostné zariadenie.

⁴<http://lcdsmartie.sourceforge.net/>

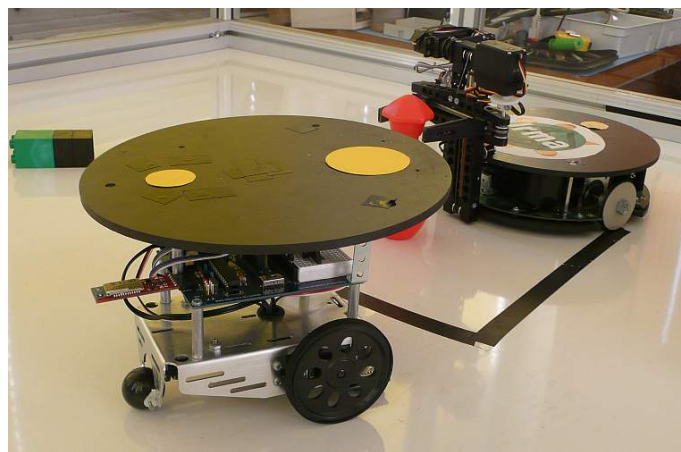
6 Bioinšpirácia: experiment v interaktívnom inteligentnom prostredí

Overenie celej koncepcie systému Acrob sme potvrdili dvoma praktickými experimentmi. Pre nedostatok miesta tu opíšeme len jeden z nich. V ňom otestujeme reálne možnosti modularity mobilného robota Acrob a zároveň ilustrujeme aj možnosti ďalšieho silného inšpiračného zdroja pre navrhovanie robotických systémov – prírody.

V experimente budeme využívať len dostupné moduly. Okrem toho demonštrujeme výhodu integrácie robota do inteligentného prostredia a niektoré problémy, ktoré bude treba v budúcnosti riešiť.

Inšpirácia pre tento pôvodný experiment pochádza z pozorovania životného cyklu motýľov čelade Modráčikovité (*Maculinea*) a ich naviazania na mravce rodu *Myrmeca* (myrmekofília) [19], [20] a [21]. Táto väzba je pomerne bežná a mnohé druhy si vypestovali vzájomne výhodné vzťahy, kedy mravce poskytujú útočisko a ochranu druhom, ktoré produkujú sladké šťavy pre mravce. Mravce na dorozumievanie používajú chemické signály a vymieňajú si medzi sebou dôležité informácie prostredníctvom zložitých organických molekúl. Ale len húsenice motýľov modráčika dokázali tento kód napodobniť a zneužiť ho pre svoje vlastné účely.

Tento zaujímavý životný cyklus nám poslužil ako inšpirácia pri pokuse napodobniť toto správanie robotickými zariadeniami. V našom prípade budeme za mravenisko považovať naše laboratórium s možnosťou vzdialeného prístupu, ktorého riadnymi „obyvateľmi“ sú dve až tri Robotnačky. V experimente sme chceli prispôsobiť nový robot Acrob, ktorý popisujeme v tejto práci, pre život v laboratóriu so vzdialeným prístupom a pokúsime sa zlepšiť jeho takmer nulové navigačné schopnosti tým, že získa prístup k informáciám, ktoré sú v laboratóriu k dispozícii. Tým experimentálne potvrdíme možnosti využívania informácií z inteligentného prostredia mobilným robotom.



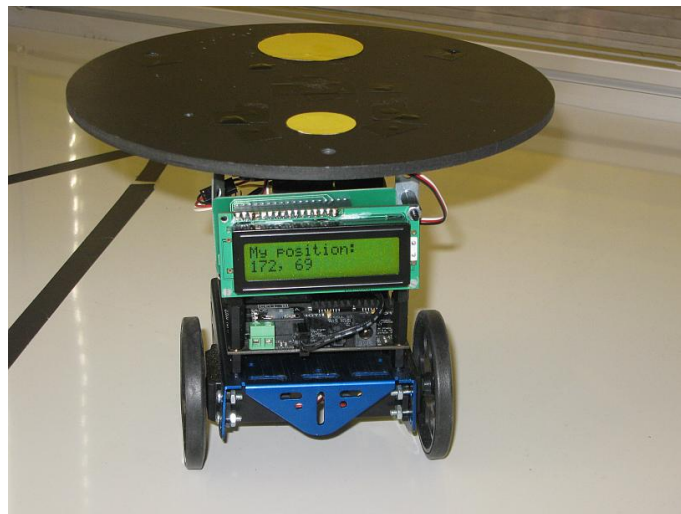
Obr. 8: Robot Acrob doplnený o rozhranie Bluetooth a identifikačný obrazec.

Laboratórium je prístupné 24 hodín denne a roboty v ňom naviguje užívateľ prostredníctvom webového rozhrania. Navigácia je podporovaná na strane servera rozpoznávaním polohy robotov v obraze z kamery umiestnenej nad plochou laboratória. Server musí najprv obraz, ktorý trpí značným súdkovitým skreslením adjustovať na

základe kalibračných parametrov. V takomto obraze s rozmermi 640 x 480 pixelov rozpoznáva roboty. Server identifikuje v obraze z kamery žlté kruhy a vypočíta súradnice ich ťažiska $[X, Y]$. Súradnice sú v pixeloch daného obrazu. Stanovené súradnice sa ukladajú na preddefinované miesto. Táto informácia je verejne prístupná na adrese <http://147.175.115.53/imgcalib/robots.txt>.

Aby mal robot túto informáciu k dispozícii, musíme mu umožniť pripojenie na sieť Internet. Buď bude robot vybavený aj Wi-Fi modulom, pomocou ktorého sa pripojí do Internetu a dokáže pristupovať k informáciám sám, alebo upravíme komunikačný protokol a robot získa informáciu od servera pomocou dodatočne implementovaných správ. Keďže nám v experimente ide o imitáciu parazitovania v existujúcom systéme, zvolíme prvé riešenie, hoci pri praktickej realizácii je istotne vhodnejšia úprava protokolu a jedno komunikačné rozhranie.

Tu vidíme výhodu inteligentného prostredia, ktoré má k dispozícii informáciu inak pre robot nedostupnú. Jednoduchý robot bez odometrie a ďalších navigačných senzorov nemá ako zistiť na jednoliatej ploche svoju polohu. Naopak, pre server využívajúci kameru nad plochou na rutinné zisťovanie polohy Robotnačiek je to úloha jednoduchá.



Obr. 9: Robot úspešne zistil svoju polohu.

Keď teda robotu poskytneme informáciu z prostredia, môžeme aj jednoduchými prostriedkami dosiahnuť vyššiu kvalitu riadenia robota. Napríklad je možné navigovať ho na určené miesto s presnosťou inak nedosiahnuteľnou.

Pri vytvorení takéhoto robota potrebujeme niekoľko modulov. Okrem základnej riadiacej jednotky Acrob využijeme komunikačný modul Bluetooth, počas ladenia programu oceníme zobrazenie na lokálnom LCD displeji (modul HMI). Na pripojenie k sieti Internet vytvoríme špeciálny modul – použijeme modul Arduino UNO s WiFi adaptérom a využijeme existujúcu knižnicu funkcií pre tento modul. Výsledkom bude opäť samostatná jednotka – modul, ktorý sa k riadiacej jednotke Acrob pripojí cez sériové rozhranie.

V procese experimentálneho overenia sme dosiahli rozpoznávanie polohy robota s periódou 1 sekunda, čo je pre danú rýchlosť pohybu postačujúce, hoci by sa pravdepodobne dala v istých prípadoch znížiť.

7 Záver

Cieľom tejto dizertačnej práce bolo

1. analyzovať súčasný stav rozvoja robotiky a identifikovať hlavné problémy brániace jej širšiemu využitiu,
2. navrhnúť metódy, ktoré by identifikované bariéry dokázali prekonať alebo aspoň obísť,
3. navrhnúť vysoko modulárny robotický systém na úrovni hardvéru i softvéru, ktorý predstavuje vhodné prostriedky so širokým využitím v pedagogickom procese i vo výskume, a experimentálne overiť efektívnosť navrhovaných metód,
4. využitie horeuvedených poznatkov v pedagogickom procese.

Analyzovali sme bariéry, ktoré podľa nášho názoru bránia širšiemu rozvoju a aplikácii robotiky nielen v domácnostiach, ale i vo výskume a školstve. Ako riešenie ponúkame niekoľko metód návrhu, ktoré sa dokážu s niektorými problémami vysporiadať a prípadne aj získať novú kvalitu.

Na príkladoch zrealizovaných projektov sme ukázali zmysluplnosť a opodstatnenosť nášho prístupu. Predstavili sme unikátny projekt laboratória so vzdialeným prístupom, ktoré je nepretržite 24 hodín denne už niekoľko rokov prístupné širokej verejnosti.

Druhým významným a unikátnym projektom je modulárne navrhnutý robot Acrob, ktorý sa úspešne používa nielen na FEI STU v Bratislave v bežnej výučbe, ale aj vo svete a má široký potenciál ďalšieho rozvoja. Experimentmi sme dokázali, že modulová koncepcia je životaschopná a umožňuje rýchlo a lacno realizovať zaujímavé projekty.

Z teoretického hľadiska je prínosom práce analýza energetickej náročnosti mobilného robota z hľadiska stupňa autonómnosti robota. Navrhli sme metodiku, ktorú je možné využiť v návrhovej fáze a na jej základe rozhodnúť o rozmiestnení komponentov robota a prípadnom využití prostriedkov ambientnej inteligencie.

Z praktického hľadiska je prínosom práce návrh modulárneho robotického systému Acrob, bezprostredne použiteľného vo výučbe a vo výskume na rýchle overenie hypotéz a návrh nových experimentov. Súčasťou práce je aj pokus o identifikáciu výrazných smerov, ktorými by sa ďalší výskum v tejto oblasti mal uberať.

Veríme, že výsledky tejto práce sú využiteľné nielen vo výučbe, ale aj pri propagácii robotiky a techniky vo všeobecnosti na verejnosti a v ďalšej výskumnej činnosti.

Zo záverov práce vyplýva potreba výskumu v oblasti distribúcie inteligencie, inteligentných metód riadenia a integrácie mobilných robotických systémov do prostredia, v ktorom pracujú.

Literatúra

- [1] Gurvinder S. Virk. CLAWAR modularity for robotic systems. *I. J. Robotic Res.*, 22(3-4):265–280, 2003.
- [2] Sami Ylönen. *Modularity in Service Robotics. Techno-Economic Justification through a Case Study*. PhD thesis, Helsinki University of Technology, 2006.
- [3] E. Colon and H. Sahli. Software modularity for mobile robot applications. In *International Conference on Climbing and Walking Robots (CLAWAR)*, page 424, 2003.
- [4] Gurvinder S. Virk. The CLAWAR project: Developments in the oldest robotics thematic network. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 12:14–20, 2005.
- [5] Richard Balogh. Control system for hybrid electric drive. *AT&P Journal Plus*, 10(1):80–83, May 2010. ISSN 1336-5010.
- [6] Yongguo Mei, Yung-Hsiang Lu, Y. Charlie Hu, and C. S. George Lee. A case study of mobile robot's energy consumption and conservation techniques. In *Proceedings of the 12th International Conference on Advanced Robotics (ICAR'05)*, pages 492–497. IEEE, 2005.
- [7] Fred Snijders. Ambient intelligence technology: An overview. In *Ambient Intelligence*, pages 255–270. Springer, 2005.
- [8] W.R. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks. In *Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences*, volume 2, page 10, 2000.
- [9] Chia Ching Ooi and Christian Schindelhauer. Minimal energy path planning for wireless robots. *Mob. Netw. Appl.*, 14(3):309–321, June 2009.
- [10] Yongguo Mei, Yung-Hsiang Lu, Y. Charlie Hu, and C. S. George Lee. Deployment of mobile robots with energy and timing constraints. *IEEE Transactions on Robotics*, 22(3):507–522, 2006.
- [11] Richard Balogh. Acrob - an Educational Robotic Platform. *AT&P Journal Plus*, 10(2):6–9, November 2010. ISSN 1336-5010.
- [12] Richard Balogh. Laboratory exercises with Acrob robot. In *Proceedings of 2nd International Conference on Robotics in Education (RiE 2011)*, pages 41–46. Vienna, Austria, 2011.
- [13] B. Salemi, M. Moll, and W.M. Shen. SUPERBOT: A deployable, multi-functional, and modular self-reconfigurable robotic system. In *Proc. of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 3636–3641. IEEE, 2006.
- [14] Zheng Fang, Yanhua Fu, and Tianyou Chai. A low-cost modular robot for research and education of control systems, mechatronics and robotics. In *4th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA '09)*, pages 2828–2833. IEEE, 2009.
- [15] Andrew Lindsay. *Robotics with the Boe-Bot. Student Guide*. Parallax, Inc., version 2.2 edition, 2004. ISBN 1-928982-03-4.

- [16] S. Panich. Data communication in mobile robot application with I²C Bus. *Journal of Computer Science*, 6(3):296–301, 2010.
- [17] Parallax. HB-25 Motor Controller. Datasheet, April 2007.
- [18] Peter Morvay. Moduly pre servisné mobilné roboty. Diplomová práca, Slovenská technická univerzita v Bratislave, 2012.
- [19] Thomas Damm Als, David R. Nash, and Jacobus J. Boomsma. Adoption of parasitic *Maculinea alcon* caterpillars (Lepidoptera: Lycaenidae) by three *Myrmica* ant species. *Animal Behaviour*, 62(1):99–106, 2001.
- [20] David R. Nash, Thomas Damm Als, Roland Maile, Graeme R. Jones, and Jacobus J. Boomsma. A mosaic of chemical coevolution in a large blue butterfly. *Science Signalling*, 319(5859):88, 2008.
- [21] Thomas D. Als, Roger Vila, Nikolai P. Kandul, David R. Nash, Shen-Horn Yen, Yu-Feng Hsu, André A. Mignault, Jacobus J. Boomsma, and Naomi E. Pierce. The evolution of alternative parasitic life histories in large blue butterflies. *Nature*, 432(7015):386–390, 2004.

Vybrané publikácie autora

- [1] Richard Balogh. Acrob - an Educational Robotic Platform. *AT&P Journal Plus*, 10(2):6–9, November 2010. ISSN 1336-5010.

Citované v:

- [1.1] Dorit Assaf and Rolf Pfeifer. EmbedIT – an Open Robotic Kit for Education. In David Obdrzalek and Achim Gottscheber, editors, *Research and Education in Robotics – Eurobot 2011*. Springer Verlag, volume 161 of *Communications in Computer and Information Science*, page 350. Springer, 2011. 4th International Conference on Research and Education in Robotics, June 15-17, 2011, Charles University in Prague, Czech Republic.
- [1.2] Dorit Assaf and Rolf Pfeifer. Robotics as part of an informatics degree program for teachers. In Matthew Koehler and Punya Mishra, editors, *Proceedings of Society for Information Technology & Teacher Education International Conference 2011*, pages 3128–3133, Nashville, Tennessee, USA, March 2011. AACE.
- [1.3] Martin Dekan, František Duchoň, Ladislav Jurišica, and Anton Vitko. Platform iRobot Create for Educational Purposes. In *Proceedings of the 4th International conference Modelling of Mechanical and Mechatronic systems*, Herľany, Slovak Republic, September 2011. Faculty of Mechanical Engineering, Technical University of Košice.
- [1.4] Dorit Assaf, Jorgen Christian Larsen, and Markus Reichardt. Extending mechanical construction kits to incorporate passive and compliant elements for educational robotics. In *Proceedings of the 3rd international conference on Robotics in Education, RiE2012*, pages 33–40. MatfyzPress, Czech Republic, 2012. ISBN 978-80-7378-219-1.
- [1.5] David Rihtaršič and Slavko Kocijancic. The role of equipment and accessories in the early teaching of robotics. *World Transactions on Engineering and Technology Education*, 10(1):29–34, 2012.
- [1.6] Pablo Vieira Rego. Integrating 8-bit AVR Micro-Controllers in Ada. *ADA User Journal*, 33(4):301–305, December 2012.
- [2] Richard Balogh. Laboratory exercises with Acrob robot. In *Proceedings of 2nd International Conference on Robotics in Education (RiE 2011)*, pages 41–46. Vienna, Austria, 2011.
- [3] Pavel Petrovič and Richard Balogh. Deployment of remotely-accessible robotics laboratory. *International Journal of Online Engineering (iJOE)*, 8(2):31–35, March 2012. ISSN 1861-2121.

Citované v:

- [3.1] Miroslav Kulich, Jan Chudoba, Karel Košnar, Tomáš Krajník, Jan Faigl, and Libor Přeučil. Syrotek – distance teaching of mobile robotics. *IEEE Transactions on Education*, 56(1):18–23, February 2013.
- [4] Richard Balogh. Ketchup house – a promising robotic contest. In David Obdrzálek, editor, *3rd Conference on Robotics in Education 2012*, volume 3, pages 41–45, Praha, 2012. Matfyzpress.
- [5] Pavel Petrovič and Richard Balogh. Experiences from Deployment of Remotely-Accessible Robotics Laboratory. In *Proceedings of the 1st Experiment@ International Conference (exp.at'11)*. Lisbon, Portugal, 2011.
- [6] Richard Balogh. Model of the ball-tracing robot. *Metallurgija/Metallurgy*, 49(2):136–140, April/June 2010. ISSN 0543-5846.

Citované v:

- [6.1] Andrej Lúčny. Sensory-motor approach to scene recognition. In Kvasnička Kelemen, editor, *Cognition and Artificial Life'10*. SLU Opava, 2010.
- [7] Richard Balogh. Basic activities with the Boe-Bot mobile robot. In *DidInfo 2008. 14th International Conference*. FPV UMB, Banská Bystrica, Slovakia, 2008.

Citované v:

- [7.1] E. Bilotta, L. Gabriele, R. Servidio, and A. Tavernise. Edutainment robotics as learning tool. *Transactions on Edutainment III*, III:25–35, 2009.
- [7.2] Fanny Riedo, Philippe Réturnaz, Luc Bergeron, Nathalie Nyffeler, and Francesco Mondada. A two years informal learning experience using the Thymio robot. In Ulrich Rückert, Sitte Joaquin, and Werner Felix, editors, *Advances in Autonomous Mini Robots*, pages 37–48. Springer Berlin Heidelberg, 2012.
- [7.3] S. Magnenat, F. Riedo, M. Bonani, and F. Mondada. A programming workshop using the robot Thymio II: The effect on the understanding by children. In *Advanced Robotics and its Social Impacts (ARSO), 2012 IEEE Workshop on*, pages 24–29, May.
- [7.4] Carlos García-Saura and Juan González-Gómez. Low cost educational platform for robotics, using open-source 3D printers and open-source hardware. In *Proceedings of the 5th International Conference of Education, Research and Innovation (ICERI 2012)*, Madrid (Spain), November 2012.
- [8] Pavel Petrovič and Richard Balogh. Educational Robotics Initiatives in Slovakia. In *SIMPAN 2008. International Conference on Simulation, Modeling and Programming for Autonomous Robots*. Venice, Italy, November, 3-7 2008.

Citované v:

- [8.1] Dimitris Alimisis. *Teacher Education on Robotics-Enhanced Constructivist Pedagogical Methods*. School of Pedagogical and Technological Education (ASPETE), 2009. ISBN 978-960-6749-49-0.
- [8.2] D. Alimisis and C. Kynigos. Constructionism and robotics in education. *Teacher Education on Robotic-Enhanced Constructivist Pedagogical Methods*, 1:11–26, 2009.
- [8.3] D. Alimisis, J. Arlegui, N. Fava, S. Frangou, S. Ionita, E. Menegatti, S. Monfalcon, M. Moro, K. Papanikolaou, and A. Pina. Introducing robotics to teachers and schools: Experiences from the TERECoP project. In *Proceedings of the Constructionism 2010 Conference*, pages 16–20, 2010.
- [9] Richard Balogh. Practical kinematics of the differential driven mobile robot. *Acta Mechanica Slovaca*, 11(2-A):11–16, 2007. ISSN 1335-2393.

Citované v:

- [9.1] Václav Králík and Mariana Kuffová. Indoor navigation and mapping robot system. In *ICMT '09 – International conference on Military Technologies*, pages 499–502. Brno : University of Defence, 5 to 6 May 2009.
- [9.2] Pavel Petrovič. Incremental evolutionary methods for automatic programming of robot controllers. Technical report, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, November 2007. Thesis for the degree philosophiae doctor.
- [9.3] R. Rashid, I. Elamvazuthi, M. Begam, and M. Arrofiq. Differential drive wheeled mobile robot (wmr) control using fuzzy logic techniques. In *2010 Fourth Asia International Conference on Mathematical/Analytical Modelling and Computer Simulation*, pages 51–55. IEEE, 2010.

- [9.4] František Duchoň, Martin Dekan, Ladislav Jurišica, and Anton Vitko. Some applications of laser rangefinder in mobile robotics. *Journal of Control Engineering and Applied Informatics*, 14(2):50–57, 2012. ISSN 1454-8658.
- [10] Pavel Petrovič, Richard Balogh, Andrej Lúčny, and Ronald Weiss. Using Robotnáčka in Research and Education. In *Eurologo 2007 Conference*. FMFI UK, 2007.
- [11] Richard Balogh. A survey of robotic competitions. I am a Robot – Competitor. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2(2):144–160, 2005.
- Citované v:
- [11.1] Andra Keay. Robocup subculture: the pursuit of heroic masculinity in robot soccer competitions. Technical report, The University of Sydney, 2010.
- [11.2] Pavel Petrovič. Incremental evolutionary methods for automatic programming of robot controllers. Technical report, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, November 2007. Thesis for the degree philosophiae doctor.
- [11.3] Richárd Szabó. *Mobil ágensek navigációjának vizsgálata szimulációs környezetben*. PhD thesis, Budapest, Eotvos Loránd Tudományegyetem Informatika Doktori Iskola, 2006.
- [11.4] Pablo Gil Vázquez, Santiago Timoteo Puente Méndez, Francisco Andrés Candelas Herías, Iván Perea Fuentes, Gabriel Jesús García Gómez, Carlos Alberto Jara Bravo, and Juan Antonio Corrales Ramón. An experience on mechatronics teaching on undergraduate students by means of the Skybot platform: from classroom to robot competition. *International Journal of Robots, Education and Art (IJREA)*, 2(2):1–15, Aug 2012. ISSN 2233-937X.
- [12] Richard Balogh. Robotics Competitions in Slovakia. In *CLAWAR / EURON / IARP Workshop on Robots in Entertainment, Leisure and Hobby - ELH'04, Vienna, Austria, 2.-4.12.2004.*, pages 25–28, Wien, Austria, 2004. Vienna University of Technology.