

VUTBOT 2 MOBILE ROBOT UNDERCARRIAGE KINEMATICS AND SUBMODULES OF ITS MULTIPROCESSOR CONTROL SYSTEM

Š. Szabó^{*}, R. Knoflíček^{}**

Summary: As a result of the aims of the Research Centre for Machine Engineering Manufacturing Technology and Equipment (joint project of ČVUT Praha and SST Praha) and Subtask No. 3: Automatic Manipulation at Work Stations and in Manufacturing Systems (robotization and manufacturing logistics) work is in progress on the research, development, design, construction of the VUTBOT 2 autonomous, locomotive – mobile robot.

Subtask No. 3 of Project No. 6 is to design, develop, manufacture, and (functionally and operationally) test an autonomous mobile robot intended for inter-operation transport in a flexible manufacturing system – multiprofessional automatic manufacturing system – with a pallet-less manipulation of the works.

This contribution summarizes the partial results accomplished in the field of design and construction of the machineware, hardware, software and brainware in 2003 and concentrates on the following:

- *Kinematic model of a real engineering product*
- *Multi-processor control system*
- *Control system submodules*

1. Úvod do problematiky a zdůvodnění vývoje a výroby ALR-MR

Mobilní robot, pod jménem VUTBOT 2, vyvinutý na Ústavu výrobních strojů, systémů a robotiky Fakulty strojního inženýrství VUT v Brně je určen pro mezioperační dopravu a automatickou manipulaci v technologických pracovištích a ve výrobních systémech.

Konstrukce mobilního robotu vychází ze čtyřkolového podvozku s říditelnou zadní nápravou a poháněnými předními koly. Robot je osazen multisenzorickým systémem pro automatickou navigaci v prostředí a identifikaci překážek a kolizních situací.

Pro mezioperační dopravu součástí ve výrobních linkách existují různá zařízení od těch nejjednodušších (např. pásový dopravník) až po složitější jako jsou např. automaticky řízené indukční vozíky (ADV). Všechna tyto zařízení pracují v tzv. „tvrdém“ pracovním cyklu, tzn. nedá se snadno měnit jejich uspořádání, nebo naplánované jízdní dráhy. Při změnách ve výrobě poté vznikají velké časové a finanční ztráty pro jejich přepracování na nový výrobní

^{*} Dipl. Eng., Brno University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering, Technická 2, 616 69, Brno, Czech Republic, tel: ++420 5 4114 3418, e-mail: szabo@uvss.fme.vutbr.cz

^{**} Assoc. Prof. Dipl. Eng., PhD, Brno University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering, Technická 2, 616 69, Brno, Czech Republic, tel: ++ 420 5 4114 2474, e-mail: knoflicek@uvss.fme.vutbr.cz

program. Z tohoto důvodu byl na Ústavu výrobních strojů, systémů a robotiky Fakulty strojního inženýrství VUT v Brně započat vývoj mobilního robotu (MR), jako autonomně pracujícího prostředku pro mezioperační dopravu a automatickou manipulaci v technologických pracovištích a ve výrobních systémech.

Cílem projektu je zhotovení plně funkčního a provozuschopného prototypu, který pracuje v plně automatickém cyklu se snadno přeprogramovatelným algoritmem jízdních drah a koncových bodů.

2. Účel a určení ALR-MR

Autonomní lokomoční – mobilní robot je určen pro vnitřní částečně, nebo úplně známé prostředí.

Analýzou mapy získané laserovým skenerem se robot dokáže vyhýbat statickým i dynamickým překážkám. Z tohoto důvodu není nutné technologickou scénu zcela uzavírat a mohou se zde pohybovat řádně poučení pracovníci, popř. další i mobilní roboty. K určení své polohy a orientace potřebuje znát jednak mapu technologické scény ve které se bude pohybovat a také mapu okolního prostředí (z laserového skeneru). Porovnáním těchto map, např. metodou „map-matching“ pak robot určí svou pozici.

Pro přepravu výrobních dílců je mobilní robot vybaven speciální nástavbou, která zajišťuje přesné ustavení vezené palety, na předem určeném místě v tzv. dokovací stanici. Jelikož mohou být součástky na paletě uloženy a prostorově zorientovány pokaždé na totožných místech, je možné je zakomponovat do roboticky obsluhované výrobní linky, která je budována v těžkých laboratořích výše zmiňovaného ústavu.

Podrobný popis ALR – MR

Vlastní konstrukční uspořádání skupin ALR – MR VUTBOT 2, lze rozdělit na několik základních částí, které jsou vzájemně propojeny:

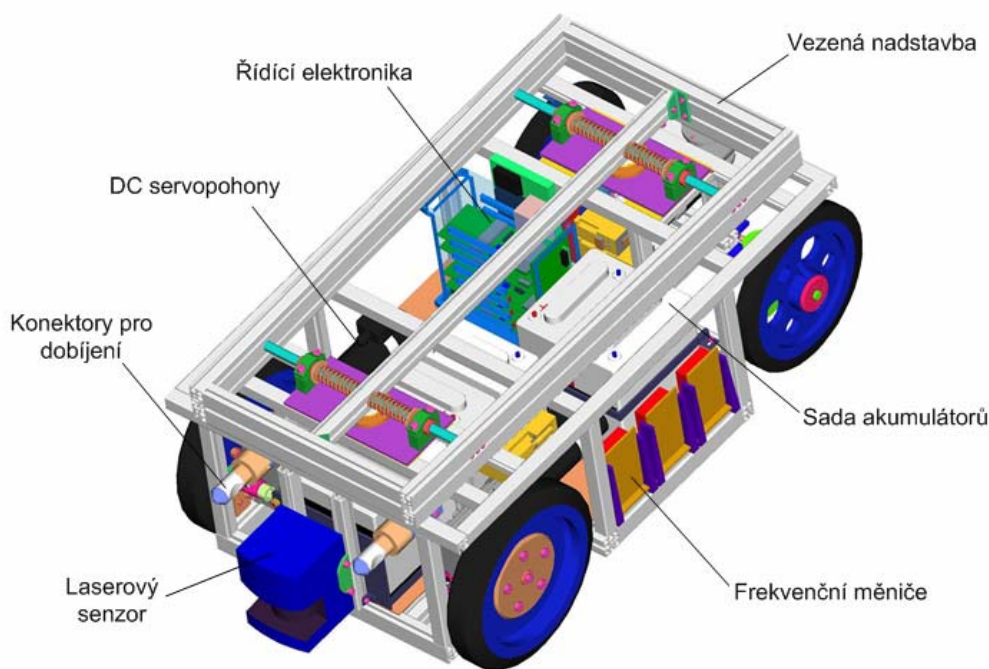
- Lokomoční podsystem:
 - Pohonné jednotky
 - Frekvenční měniče
 - Rám (hlavní)
 - Krytovací desky
- Palubní energetická síť
 - Akumulátory (AKB)
 - Monitoring stavu nabití akumulátorů
 - Konektory pro připojení do nabíjecí stanice
- Řídicí systém
 - Komunikační modul
 - Senzorický modul
 - Lokomoční modul
 - Modul řízení
 - Modul manuálního ovládání
- Multisenzorický systém
 - Vnitřní senzorický systém
 - Vnější senzorický systém
- Účelové nadstavby

Mobilní robot je sestaven ze snadno dostupných a vyrobitelných součástí, které byly většinou testovány na starších vývojových řadách MR vlastních, univerzitních konstrukcí. Mezi základní vlastnosti lze zařadit:

- pohyb v technologické scéně a doprava vezených palet
- plánování dráhy včetně vyhýbání se statickým i pohybujícím se překážkám

Základní technické údaje a vyobrazení (viz obr. 1):

- | | |
|---------------------------------|------------------------------|
| - rychlost pojezdu: | min. 15 cm/min, max. 1,5 m/s |
| - zrychlení: | max. 1 ms ⁻² |
| - celková hmotnost: | cca 350 kg |
| - hmotnost MR bez nákladu: | cca 200 kg |
| - možnost překonávání překážky: | do výšky 25 mm |
| - možnost stoupání: | do 10° |
| - min. poloměr zatočení: | cca 850 mm |



Obr. 1: Mobilní robot VUTBOT 2

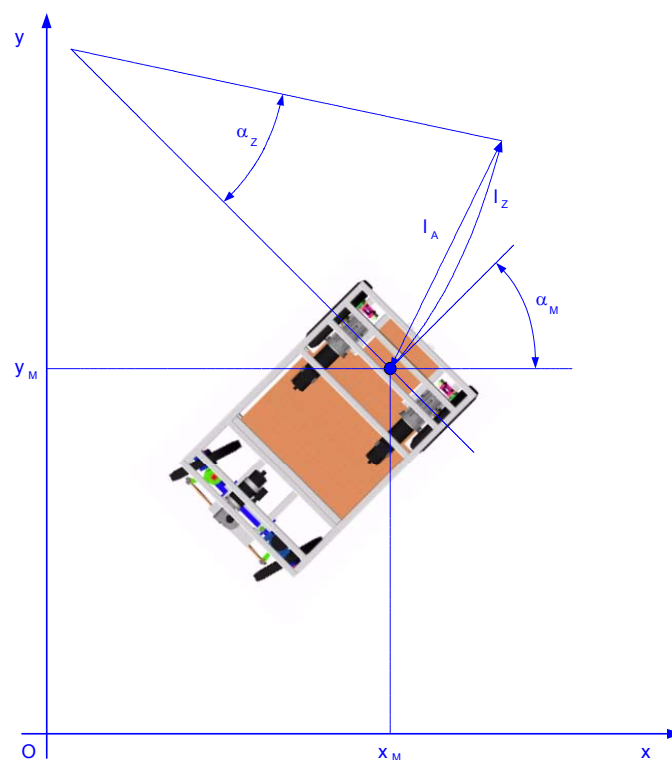
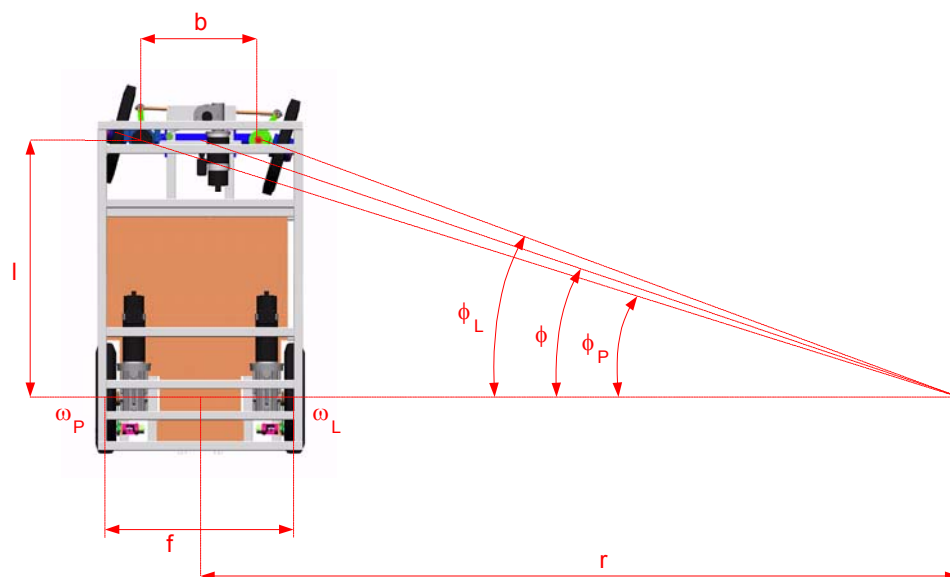
3. Kinematický model robotu

Sestavení kinematického modelu mobilního robotu má zásadní význam pro technicky správné řízení a navigaci mobilního robotu. Úhlové rychlosti předních kol se nastavují na základě požadované hodnoty rychlosti v a úhlu φ . Úhlový diferenciál pootočení zadních kol je zabezpečen vhodnou mechanickou konstrukcí.

Pohybové rovnice lze sestavit za předpokladu, že:

- pohyb modelu je rovinný
- kontakt mezi koly a povrchem je bodový

- robot je pevné těleso
- spojení vazeb je bez tření
- otáčení kol je bez prokluzů



Obr. 2 Schéma konstrukce podvozku pro určení kinematických rovnic MR

A) Kinematické rovnice

ujetě vzdálenosti předních kol:

$$l_L = \left(r - \frac{f}{2}\right) \alpha_Z = \frac{\beta_L}{2\pi} 2\pi r_F \quad [1]$$

$$l_P = \left(r + \frac{f}{2}\right) \alpha_Z = \frac{\beta_P}{2\pi} 2\pi r_F \quad [2]$$

změna orientace:

$$\alpha_Z = \frac{r_F}{f} (\beta_P - \beta_L) \quad [3]$$

přírůstek ujeté dráhy:

$$l_Z = r_F \frac{\beta_P + \beta_L}{2} \quad [4]$$

přímková aproximace přírůstku ujeté dráhy:

$$l_A = 2 \left(\frac{l_Z}{\alpha_Z} \sin\left(\frac{\alpha_Z}{2}\right) \right) \quad [5]$$

x-souřadnice polohy robotu v souřadném systému v čase t+1:

$$x_{M'} = x_M + l_A \cos\left(\alpha_M + \frac{\alpha_Z}{2}\right) \quad [6]$$

y-souřadnice polohy robotu v souřadném systému v čase t+1:

$$y_{M'} = y_M + l_A \sin\left(\alpha_M + \frac{\alpha_Z}{2}\right) \quad [7]$$

orientace robotu v čase t+1:

$$\alpha_{M'} = \alpha_M + \alpha_Z \quad [8]$$

délka ujeté dráhy v čase t+1:

$$l_D' = l_D + l_Z \quad [9]$$

směr jízdy:

$$\tan(\phi) = \frac{l}{r} \quad [10]$$

úhel natočení zadních kol:

$$\tan(\phi_L) = \frac{l}{r + \frac{b}{2}} \quad [11]$$

$$\tan(\phi_P) = \frac{l}{r - \frac{b}{2}} \quad [12]$$

úhlové rychlosti předních kol:

$$\omega_L = \omega \left(1 - \frac{f}{2l} \tan(\phi) \right) \quad [13]$$

$$\omega_p = \omega \left(1 + \frac{f}{2l} \tan(\phi) \right) \quad [14]$$

B) Použité veličiny ve výše uvedených vztazích:

β_L	úhlové potočení levého předního kola
β_P	úhlové potočení pravého předního kola
r_F	rádus předního kola
l_L	ujetá vzdálenost levého kola
l_P	ujetá vzdálenost pravého kola
f	rozteč předních kol
α_Z	změna orientace
r	rádus dráhy
l_Z	přírůstek ujeté dráhy
l_A	přímková aproximace přírůstku ujeté dráhy
x_M	x-poloha robotu v souřadném systému v čase t
x_M'	x-poloha robotu v souřadném systému v čase $t+1$
y_M	y-poloha robotu v souřadném systému v čase t
y_M'	y-poloha robotu v souřadném systému v čase $t+1$
α_M	orientace robotu v čase t
α_M'	orientace robotu v čase $t+1$
l_D	délka ujeté dráhy v čase t
l_D'	délka ujeté dráhy v čase $t+1$
l	délka robotu
b	rozteč zadních kol
ϕ	směr jízdy
ϕ_P	úhel potočení pravého zadního směrového kola
ϕ_L	úhel potočení levého zadního směrového kola
ω_P	úhlová rychlost pravého předního kola
ω_L	úhlová rychlost levého předního kola

4. Řídicí systém

Řídicí systém (obr. 3) je řešen jako víceprocesorový distribuovaný systém složený z několika samostatných procesorových modulů.

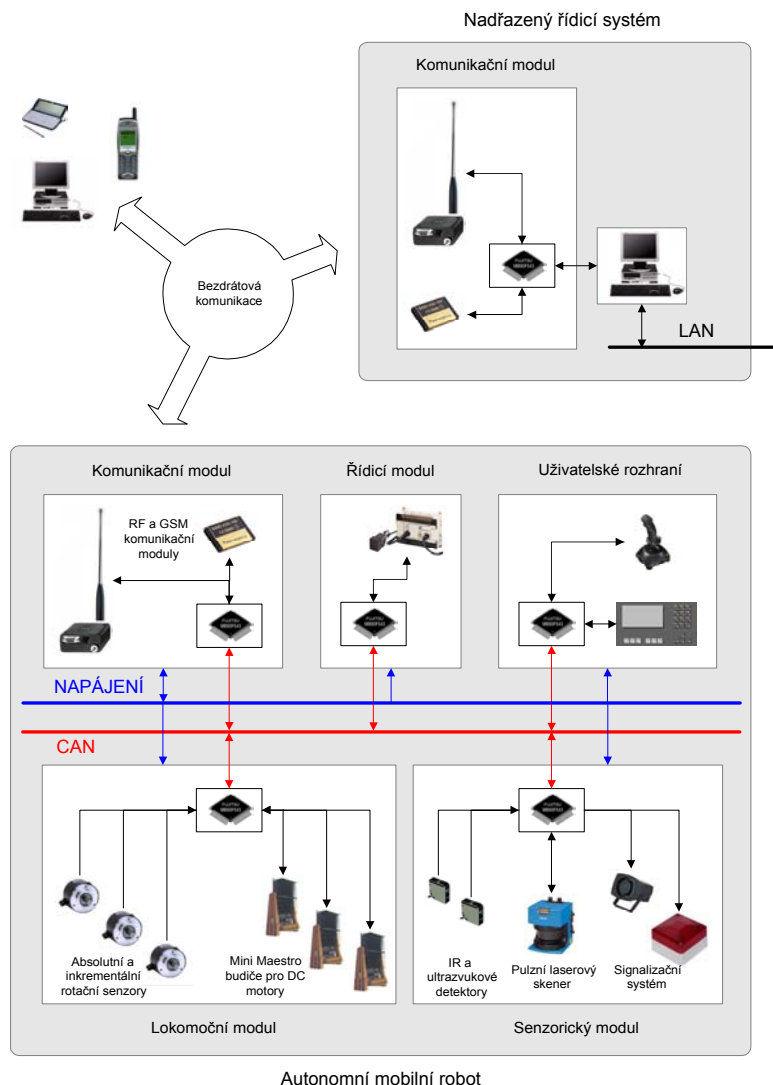
ŘS se skládá ze tří hlavních, vzájemně souvisejících částí:

- mobilní podvozek s víceprocesorovým řídicím systémem,
- modul vyšší vrstvy řízení, který reprezentuje vstupní/výstupní komunikační bránu, a může sloužit ke specifikaci činnosti ALR, zadávání globální mapy a monitorování činnosti,
- další, neméně důležitou částí řídicího systému mohou být mobilní řídicí systémy, sloužící k monitorování a případně k řízení činnosti ALR.

Řídicí systém mobilního robotu je rozčleněn do několika funkčních bloků – modulů :

- Komunikační modul - zabezpečuje komunikaci mezi mobilním robotem a výrobním systémem, pomocí radiofrekvenčního transceiveru a sítě GSM.

- Senzorický modul –
 - laserový skenovací systém, který pracuje v IR oblasti, a na výstupu dává dva typy signálů, které umožní monitorovat a vyhodnocovat okamžité kolizní stavy (LLSS) a zároveň vytvářet globální a lokální mapy prostředí, v němž má ALR vykonávat svoji činnost,
 - sada infračervených antikolizních snímačů,
 - CCD kamerový systém pro redundantní monitoring synchronizačních znaků,
 - havarijní taktilní antikolizní snímače.
- Lokomoční modul - umožňuje nastavování žádaných veličin rychlosti a úhlu natočení zadních kol. Změna polohy a orientace se počítá na základě informací z odometrických senzorů. Tato poloha je pak korigována v synchronizačních bodech.
- Modul řízení - tento modul provádí vlastní plánování trajektorie, vyhledání „nejlepší“ cesty a vyšší stupeň řízení pohybu.
- Modul uživatelského rozhraní - pomocí tohoto modulu lze přímo řídit a analyzovat chování robotu. Slouží jako terminál pro zadávání a modifikaci vnitřních registrů modulů.



Obr. 3 Blokové schéma distribuovaného řídicího systému

Jádro sub-modulů

Každý blok systému musí být vybaven mikrořadičem, který je jednak schopen zajistit komunikaci s libovolným připojeným účastníkem, jednak vykonávat danou funkci. Jádro těchto sub-modulů tvoří velice výkonné 16-ti bitové mikrokontroléry MB90543 firmy FUJITSU. Série MB90540/545 je speciálně navržena pro automobilové a průmyslové aplikace.

Procesorový modul (obr. 4) umožňuje pomocí rozšiřujících konektorů připojení dalších elektronických obvodů. Každý modul řídicího systému obsahuje jednu komunikační desku pro komunikaci přes CAN nebo RS232 a jednu aplikační desku připojenou k druhému konektoru, která je speciálně určena pro danou aplikaci.



Obr. 4 Pohled na procesorový modul

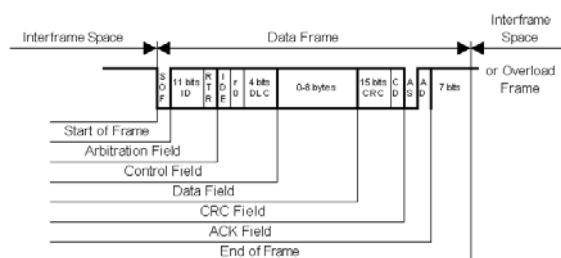
Komunikační systém

Řídicí systém umožňuje časově nedeterministické řízení v reálném čase a proto vyžaduje výkonnou a spolehlivou komunikační sběrnici, která zajišťuje jak náhodný přístup k síti, tak řeší kolizní situace.

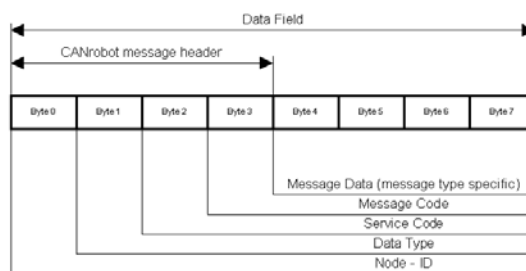
Na základě těchto požadavků byla zvolena pro komunikaci sběrnice CAN (Controller Area Network). CAN je sériový komunikační protokol (obr. 5) s max. přenosovou rychlostí do 1Mbit/s, který byl původně vyvinut firmou Bosch pro nasazení v automobilech. Vzhledem k tomu, že přední výrobci integrovaných obvodů implementovali podporu protokolu CAN do svých produktů, dochází k stále častějšímu využívání i v různých průmyslových aplikacích. Důvodem je především nízká cena, snadné nasazení, spolehlivost, vysoká přenosová rychlost, snadná rozšiřitelnost a dostupnost potřebné součástkové základny. V současné době má protokol CAN své pevné místo mezi ostatními fieldbusy a je definován normou ISO 11898.

Jednotlivé rámce CAN-u jsou označeny identifikátorem (obr. 5), který identifikuje obsah rámce. Vyslaný rámec tedy mohou přijmout všechny uzly systému současně. Takto sestavený řídicí systém je snadno SW i HW rozšiřitelný. Identifikátor má však ještě jednu funkci, definuje totiž prioritu jednotlivých rámců a řeší tak kolizní situace při současném vysílání více modulů.

Pro tento komunikační protokol existuje několik vzájemně si konkurujících standardů aplikační vrstvy a také mnoho protokolů firemních. Na základě předchozích zkušeností byla zvolena jako aplikační vrstva CANAerospace (obr. 6), která byla speciálně vyvinuta pro letecké aplikace. Standard definuje pomocné kódy obsažené v komunikačním paketu, které zvyšují bezpečnost a řídí správný přenos dat.



Obr. 5 Standardní datový rámec CAN protokolu



Obr. 6 Základní struktura CANAerospace zprávy

5. Multisenzorický systém

Senzorický systém je tvořen dvěma funkčně rozdílnými skupinami: vnitřními a vnějšími senzory. Vnitřní senzory dávají informace o změnách vnitřních stavů mobilního robotu. Vnější senzory dávají informace o změnách okolního prostředí robotu. Mezi vnitřní senzory patří inkrementální snímače měřící natočení hnacích kol a natočení rejdového čepu u zadních kol. Dále zde jsou tachodynamy integrované do DC motorů.

Pro hlídání teploty akumulátorů při nabíjení slouží sada 6 odporových teploměrů. Nejdůležitější ze skupiny vnějších senzorů je pulzní laserový skener, který dokáže skenovat prostor před robotem až do vzdálenosti 20 metrů a úhel pokrytí je 180°. Dále je zde sada infračervených dálkoměrů, které hlídají prostor za robotem při couvání. V přední části bude umístěna také lišta s taktilními senzory, jenž vydají povel k zastavení, pokud robot narazí na překážku, nebo zajede do doku.

6. Závěr

V návaznosti na záměr Výzkumného centra pro strojírenskou výrobní techniku a technologii (společný projekt ČVUT Praha a SST Praha) a na podúkol číslo 3: Automatická manipulace v technologických pracovištích a ve výrobních systémech (robotizace a výrobní logistika) je řešen výzkum, vývoj, projekce, konstrukce, výroba, oživení, ověřovací (funkční a provozní) zkoušky, zkušební provoz a praktické užití autonomního lokomočního – mobilního robotu, nazvaného VUTBOT 2.

7. Literatura

- [1] Bosch : CAN Specification, Version 2.0, Stuttgart, 1991.
- [2] Michael Stock, Flight Systems : CAN Aerospace, 2001.
- [3] Fujitsu Semiconductor, Data Sheet : MB90540/545 Series, 1994.
- [4] Szabó Š., Singule V.: Implementation of CAN communication protocol in autonomous mobile robot control. 10th International POWER ELECTRONICS and MOTION CONTROL Conference - EPE-PEMC 2002, Cavtat & Dubrovnik, Croatia, 9.-11.9.2002
- [5] Szabó Š., Opluštil V.: Distributed CAN Based Control System for Robotic and Airborne Applications. 7th International Conference - ICARCV 2002, Singapore, 2.-5.12.2002