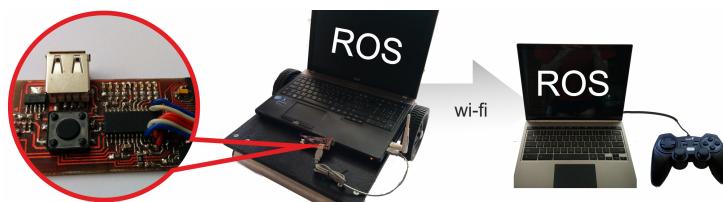


Robot řízený mikroprocesorovou jednotkou PIC napojený na ROS

Petr Heřman*



Abstrakt

Tato práce popisuje návrh robota z cenově dostupného materiálu. Implementaci firmware vlastní jednotky nižšího řízení založené na mikrokontroléru PIC, která má na starost řízení motorů, získávání dat ze senzorů a komunikaci s jednotkou vyššího řízení. Dále se věnuje realizaci napojení na robotický operační systém ROS a jeho standardní struktury umožňující využití existujících balíčku pro ovládání robota a zobrazování dat z jeho senzorů. Vyroběný prototyp je modelem robotické sekačky trávníku, ale celé řešení je univerzální. Řídící a senzorovou jednotku, jež je spojovací komponentou mezi podvozkem a počítačem s ROS, lze bez větších obtíží využít i u jiných robotů.

Klíčová slova: Levný robot — Firmware řídící a senzorové jednotky — PIC mikrokontrolér — ROS

Přiložené materiály: [Demonstrační Video](#) — [Stáhnutelný zdrojový kód](#)

*xherma20@stud.fit.vutbr.cz, Fakulta informačních technologií Vysokého učení technického v Brně

1. Úvod

Cílem této práce je výroba levného robota s řídící a senzorovou jednotkou založenou na mikrokontroléru PIC od firmy Microchip Technology Inc., která je připojena k PC, na němž běží robotický operační systém ROS¹. Výroba robota je rozdělena do několika kroků - návrh a výroba podvozku, návrh a výroba řídící a senzorové jednotky, naprogramování jejího firmware a implementace ovladače pro jednotku vyššího řízení a vyšší řízení samotné. Všechny tyto kroky jsou v práci popsány.

První klíčovou vlastností je cena robota. Běžná cena robotů využívaných akademickou sférou se pohybuje v rádu desítek tisíc korun, zatímco cena vyrobeného řešení je necelých 5000,- Kč. Další výhody plynou z použití vlastní řídící a senzorové jednotky založené na mikrokontroléru: rychlosť, spolehlivost, částečná nezávislost na vyšším řízení a nízká energet-

ická náročnost. Poslední a pro snadné rozšíření robota důležitou vlastností je využití ROS, pro něž existuje široká paleta balíčků a stává se standardem pokročilé robotiky.

Ač se jedná o univerzální řešení, vyrobený prototyp má představovat model robotické sekačky trávníku. Tomu tedy odpovídají jeho větší rozměry, vyšší váha, nízká rychlosť pohybu, sekací válec (nahražka vřetena) místo otočného kolečka a další přizpůsobení pro pohyb ve venkovním travnatém prostředí.

2. Existující podobná řešení

Roboti, které vyrábí firma Adept MobileRobots², jsou určení pro výzkum a vývoj. Jedná se o komplety – podvozek, jednotka řízení a často i integrovaná jednotka vyššího řízení – a jsou připraveni k montáži dalšího příslušenství. Převážně se jedná o roboty určené do

¹<http://www.ros.org>

²<http://www.mobilerobots.com>

vnitřních prostor nebo velmi mírného terénu a všechny je možné napojit na ROS. Asi nejblíže představovanému prototypu je Pioneer 3-AT. V základní konfiguraci ale neposkytuje žádné senzory. Mezi jeho nevýhody patří vysoká váha (12 kg) a výška (26 cm). Mezi výhody lze zařadit dlouhou dobu provozu na baterie (8 hod), velmi přesné enkodéry a možnost integrace vyšší jednotky řízení přímo v podvozku. Jeho další parametry a vlastnosti jsou velmi podobné představovanému řešení.

Další velkou skupinou robotů, operujících ve venkovním prostředí, jsou robotické sekačky trávníků (např. od firmy Husqarna³). Jedná se o komerční produkt pro běžného zákazníka. Podvozky těchto robotů jsou připraveny pro práci v obtížném terénu jako jsou velmi prudké svahy nebo mokrá tráva. Mají kola s hroty a velkým poloměrem. Jejich podvozek byl inspirací pro vytvářeného robota. Problémem těchto robotů je ale malá senzorická výbava a hlavně nemožnost běhu jiného než integrovaného software.

Co se týká samotných řídících a senzorových jednotek, tak jejich základem dnes nejčastěji bývá arduino či Raspberry PI a podobné mini-počítače. Výhodou Raspberry PI je možnost provozovat nižší i vyšší řízení zároveň na jedné desce. Pro plnohodnotný provoz ROSu je ale výkon této platformy nedostatečný. Nevhodou je nedostatek (nebo úplná absence) periferií – časovače, PWM, A/D převodníky atp. Arduino desky naopak obsahují mikrokontroléry ATmega, které mají periferií dostatek. Jedná se o vhodné řešení pro ty, kteří nemají možnost výroby vlastní desky. Navíc existuje mnoho knihoven a návodů, což usnadňuje vývoj.

Nakonec nelze nezmínit mnoho robotických hraček a podobných vlastnoručně vyrobených robotů. Jejich společným jmenovatelem je nízká cena, časté využití Arduino desek (či Raspberry PI) pro řízení a práci se senzory, využití modelářských komponent a bohužel křehkost konstrukce. Rozhodně je větší zastoupení těch co jsou určení do vnitřního prostředí.

3. Podvozek robota

Vzhledem k požadovanému využití robota byl vybrán kolový diferenčně řízený podvozek. Má velmi dobrou manévrovatelnost [1] (robot je schopný otočení na místě), dobrou prostupnost terénem a jeho kinematický model je poměrně jednoduchý. Navíc není těžké ho vyrobit.

3.1 Konstrukce

Základem celé konstrukce jsou dva stejnosměrné motory s převodovkou. Pocházejí ze dvou AKU šroubováku

³<http://www.husqvarna.com/cz/products/robotic-mowers/>

(CMI 10,8 V) a jejich hlavní výhodou je vysoký kroutící moment 18 Nm, získaný díky převodovce s převodovým poměrem 36:1. Využita jsou navíc i sklíčidla původních šroubováku, do kterých jsou upnuta kola, a baterie (včetně kompletní nabíjecí a ochranné elektroniky), zajišťující napájení pohonného subsystému. Oba tyto komplety (motor, převodovka, sklíčidlo) jsou uloženy v jednom hliníkovém jeklu a baterie s regulátory a další elektronikou v druhém (obrázek 1). Jekly, válec (imitující sekací vřeteno) a nosná deska tvoří tělo robota, na němž je umístěn notebook (jednotka vyššího řízení) a volně umístěná řídící a senzorová jednotka. Volně je umístěna proto, aby byly senzory co nejdále od motorů, které vytvářejí silné elektromagnetické rušení.



Obrázek 1. Jekly tvořící základ podvozku.

3.2 Kinematika diferenčně řízeného podvozku

Uvažujme pohyb robota pouze ve dvourozměrném prostoru. Dle Hellströma [2] jsou rovnice pro výpočet obvodové rychlosti pravého (v_1) a levého (v_2) kola následující:

$$v_1 = \omega(R + \frac{l}{2})v_2 = \omega(R - \frac{l}{2}) \quad (1)$$

Konstanta l odpovídá rozchodu kol a je pro vyrobeného robota rovna 0,4 m. Proměnná ω je v jednotkách $rad \cdot s^{-1}$ a znamená rychlosť otáčení celého podvozku. Budeme-li uvažovat pouze otáčení, jehož střed leží ve středu mezi koly, bude $R = 0$. Připočteme-li navíc u obou kol lineární dopřednou rychlosť celého robota (v), dostaneme výsledné vztahy pro obvodovou rychlosť jednotlivých kol v $m \cdot s^{-1}$:

$$v_1 = v + \omega \frac{l}{2}v_2 = v - \omega \frac{l}{2} \quad (2)$$

Kombinací lineární dopředné rychlosťi a otáčení robota kolem své osy je možné docílit jeho otáčení se středem ležícím mimo něj. Pro couvání robota stačí do rovnic dosadit negativní rychlosť v .

3.3 Řízení motorů

Kvůli vysokému odběru proudu motory bylo nutné použít dva modelářské stejnosměrné regulátory MDE32 od firmy dsys⁴. Výhodou jejich použití je jednotný způsob řízení délkou kladného pulsu PWM v rozmezí

⁴<http://dsys.cz/?prod=3&lang=cz>

od 1 ms - 2 ms s periodou 30 ms. Je tedy možné vyměnit DC motory a regulátor za AC motor a střídavý regulátor, aniž by bylo nutné měnit jednotku nižšího řízení.

4. Řídící a senzorová jednotka

Jedná se o prvek spojující podvozek robota a jednotku vyššího řízení, na které je běží ROS. Vstupy jsou:

- impulsy enkodéru (hallova sonda)
- napětí baterií (po děličce napětí)
- data od jednotky vyššího řízení

a výstupy:

- PWM řízení regulátorů
- data do jednotky vyššího řízení

Zatímco k podvozku je jednotka připojená napevně, k propojení s PC slouží USB. To je dostatečně rychlé a hlavně univerzální.

Jednotka samotná obsahuje tříosý magnetometr (kompass) HMC5883L, tříosý akcelerometr a tříosý gyroskop LSM330DL. Jedná se o integrované obvody, které jsou k mikrokontroléru připojeny přes I²C. Použity RISC mikrokontrolér PIC 24FJ64GB002 [3] má takt 32 MHz, paměť 64KB, integraci technologie USB a obsahuje dostatek periferií a pinů.

4.1 Firmware

Základní diagram běhu programu zachycuje obrázek 2.



Obrázek 2. Schéma programu mikrokontroléru

Po konfiguraci periferií a inicializaci všech senzorů a regulátoru se rozběhne nekonečná smyčka řízená

stavem USB, která zpracovává příchozí data. V rámci běhu této smyčky jsou díky přerušení časovačů periodicky spouštěny procedury řízení motorů (časovač T4) nebo čtení dat ze senzorů (časovač T5). Při každém 3. čtení senzorických dat jsou navíc akumulovaná měření odeslána přes USB.

Implementace USB komunikace je založena na knihovnách Microchip Libraries for Applications (dále MLA)⁵ a emuluje sériový port. Interně je zápis a čtení USB zprostředkován přes rozhraní USART a data jsou přenášena v binární podobě. Vzhledem k tomu, že se jedná o data převážně číselného typu, lze tím podstatně snížit množství přenášených dat než kdyby byla odesílána jako řetězce. Pro ověření bezchybnosti přenosu dat je implementována jednoduchá kontrolní suma.

Senzory, které jsou umístěny na desce (kompas, akcelerometr, gyroskop), poskytují mikrokontroléru data přes I²C. Jejich inicializace a komunikace je implementována podle technických specifikací [4] [5]. Měření napětí baterie, která je součástí podvozku robota, probíhá za pomocí ADC převodníku a výslednou hodnotu je důležité vynásobit patřičnou konstantou (kvůli děličce napětí). Impulzy z hallových senzorů, které jsou použity jako enkodéry, jsou přivedeny jako externí oscilátory do čítačů, které uchovávají jejich hodnotu.

Procedura řízení motorů je periodicky spouštěna časovačem každých 10 ms. Vzhledem k tomu, že se jedná o program přerušení s nejvyšší prioritou, je vždy zajištěno jeho provedení. O výpočet výkonu motorů se stará algoritmus PID regulace rozebraný níže a jeho výsledkem jsou délky intervalů kladného pulsu PWM, kterým jsou řízeny regulátory. Pokud jednotka delší dobu neobdrží řídící data z USB je robot zastaven do doby než jsou nějaká řídící data přijata.

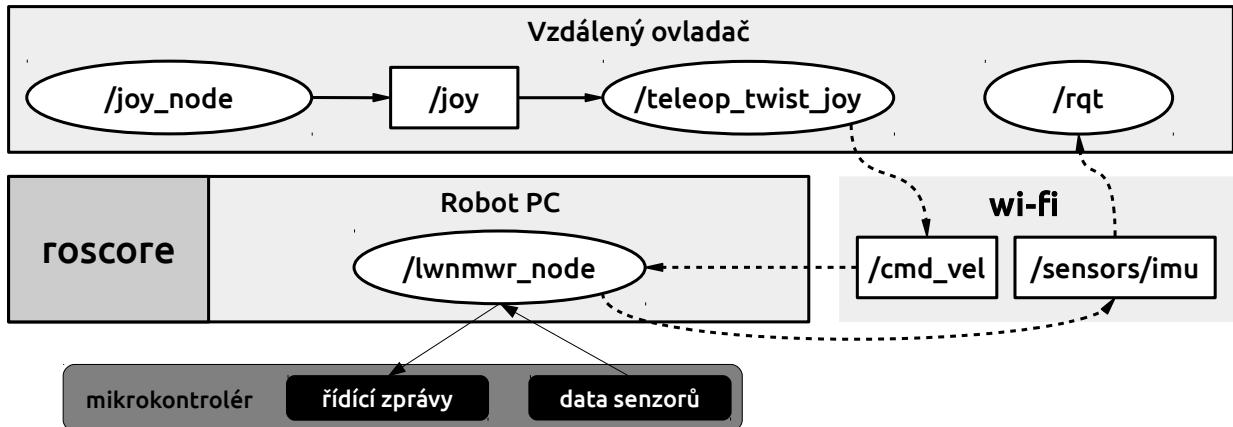
4.2 PID regulace

PID regulátor [6] slouží k zpětnovazebnému řízení na základě tří složek:

1. Proporcionální - akční veličina je přímo úměrná regulační odchylce
2. Integrační - akční veličina je přímo úměrná integrálu regulační odchylky
3. Derivační - akční veličina je přímo úměrná derivaci regulační odchylky

Jednolivé složky jsou násobeny koeficienty (K_p , K_i , K_d) a poté sečteny. Výstupní veličina je tedy získána dle rovnice:

⁵<http://www.microchip.com/mla/>



Obrázek 3. Schéma vazeb ROS uzlů a témat.

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (3)$$

Tento základní PID regulátor je využit pro řízení motorů robota. Cílová rychlosť odpovídá počtu impulzů enkodéru za sekundu a zpětná vazba je aktuální počet impulzů načtených v registru čítače ménus počet impulzů v předchozí iteraci. Nastavováním koeficientů K_p , K_i , K_d a intervalu smyčky je možné měnit charakteristiku řízení. Vhodné nastavení bylo zjištěno pomocí experimentů.

Protože využívaný enkodér slouží pouze k čítání impulzů, je nutné ho na základě znalostí o změně směru jízdy z řídících zpráv nulovat. Požadovaná rychlosť je před vstupem do PID regulátoru kladná či záporná v závislosti na směru (vpřed/vzad), avšak do regulátoru je použita absolutní hodnota rychlosťi. Výstupní hodnota je naopak násobena -1/1 podle směru.

5. Propojení s ROS

Základem napojení řídící a senzorové jednotky na ROS je naprogramovaný uzel (ROS node) zajišťující komunikaci po sériové lince (/lwnmwr_node na obrázku 3). QT framework od verze 5.2 poskytuje multiplatformní knihovnu pro práci se sériovým portem a další užitečné knihovny (QThread, QTimer, aj.). S využitím QT a C++ knihoven ROS je implementován uzel, který se přihlásí k odběru zpráv typu geometry_msgs/Twist, transformuje je do interního formátu a odešle je řídící jednotce přes sériový port. Naopak příchozí zprávy ze sériového portu, které nesou senzorická data, transformuje na zprávy ROS a publikuje je na téma, na něž náleží.

Pro ovládání robota je použito gamepad ovladače, který umožňuje buď proporcionální řízení a nebo řízení tlačítka. O získání dat z připojeného HW zařízení

se stará balík joy, který data publikuje jako zprávy typu sensor_msgs/Joy. Vzhledem k tomu, že použitý gamepad má jinak mapovaná tlačítka, bylo nezbytné vytvořit vlastní konfigurační soubor. Zprávy typu sensor_msgs/Joy je třeba dále převést na zprávy typu geometry_msgs/Twist, což má na starost balík teleop_twist_joy. Vzhledem k tomu že tyto balíky je třeba vždy spouštět současně a se správnými parametry, byl vytvořen launch soubor pro ROS. Je možné spouštět tyto uzly na počítači, který je umístěn na robotu, avšak smyslem práce je vytvořit dálkově ovládaného robota a proto se musí spustit na druhém PC, sloužícím jako vzdálený ovladač. To architektura ROS dovoluje – spojuvacím uzlem je roscore, který běží vždy pouze na jednom PC a ostatní se k němu připojí. Tako spojené počítače vzájemně vidí běžící uzly a téma a mohou k nim přistupovat.

Posledním zatím využívaným balíkem je rqt sloužící pro vykreslování grafů, vypisování zpráv z rosout, zobrazení přehledu témat a další. Opět je výhodné tento balík spouštět na počítači, který slouží jako vzdálený ovladač.

Při testování vzdáleného ovládání docházelo k rušení wifi adaptéra notebooku. Bylo způsobeno elektromagnetickým polem běžících motorů. Řešení tohoto problému je využití externího wifi adaptéra, který je umístěn v dostatečné vzdálenosti od motorů.

6. Experimenty

S výsledným prototypem bylo provedeno mnoho jízd a byly ověřeny jeho jízdní vlastnosti.

- Válec (náhražka sekacího vřetena), který je použit místo volného kolečka není problémem pro diferenciální řízení. Robot je schopen se bez větších obtíží otočit.

- Na nízko stříženém trávníku nebo vnitřních prostorách (linoleum, koberec) se kola neprotáčí. V mokré trávě a v těžším terénu se však kola začnou protáčet.
- Robot je schopen dosáhnout rychlosti až 5 km/h. Tato rychlosť je ale pro uvažované využití naprosto nevhodná. Využitelná maximální rychlosť, při které je dosahováno dostatečné přesnosti pohybu, je 1.5 km/h.
- Přesnost jízdy pouze pomocí enkodérů je silně závislá na terénu. Ve vnitřním prostředí je průměrná chyba pohybu na 10 metrů v rozmezí 0,1 m - 0,5 m (nejmenší pro pohyb rovně, nejvíce pro pohyb po osmičce). Ve lehkém terénu se pohybuje v rozmezí 0,2 m - 1 m.
- Je schopen zvládnout až 30% stoupání.

7. Závěr

V rámci této práce byl kompletně navržen a realizován cenově dostupný podvozek robota. Byl implementován firmware pro vlastní řídící a senzorovou jednotku založenou na mikrokontroléru PIC a také bylo realizováno napojení na ROS. Robot byl průběžně testován ve vnitřním i vnějším prostředí a byly prováděny experimenty, které vedly k opravám chyb a úpravám řízení. Výslednému podvozku předcházely dva prototypy. V tuto chvíli je rozpracováno získávání odometrie. Zcela chybí kalibrace senzorů a jejich využití.

Možnosti navázání na tuto práci jsou takřka neomezené hlavně díky ROS. Vzhledem k přítomnosti integrované kamery na notebooku lze například využít existujících balíčků a zprovoznit autonomní řízení robota. Navázáním na ROS je ale vytvořena závislost na robustnějším výpočetním systému (u stávajícího systému se jedná o notebook). V případě vynechání ROSu jako vyššího systému řízení lze tuto závislost eliminovat.

Řídící a senzorovou jednotku je možné využít i u jiných (například menších) robotů s diferenčně řízeným podvozkem. Tato jednotka ještě disponuje dostatečným výkonem pro implementaci některých vyšších řídících principů.

Literatura

- [1] Novák P. *Mobilní roboty: pohony, senzory, Řízení*. Praha, BEN, 2005. ISBN: 9788073001414.
- [2] Hellström T. Kinematics equations for differential drive and articulated steering. 2011. ISSN: 0348-0542.
- [3] *PIC24FJ64GB004 Family Data Sheet* [online], 2010. [cit. 2014-11-28]. Microchip Technology Inc. <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/39940d.pdf>.
- [4] *3-Axis Digital Compass IC HMC5883L* [online], 2013. [cit. 2014-12-15]. Honeywell International Inc. http://www51.honeywell.com/aero/common/documents/myaerospacecatalog-documents/Defense_Brochures-documents/HMC5883L_3-Axis_Digital_Compass_IC.pdf.
- [5] *LSM330DL: Linear sensor module 3D accelerometer sensor and 3D gyroscope sensor* [online], 2011. [cit. 2014-12-15]. STMicroelectronics. <http://media.digikey.com/pdf/Data%20Sheets/ST%20Microelectronics%20PDFS/LSM330DL.pdf>.
- [6] Li Y.; Ang K.H.; Chong G.C.Y. Pid control system analysis and design. *IEEE Control Systems Magazine*, 26(1):32–41, Únor 2006.