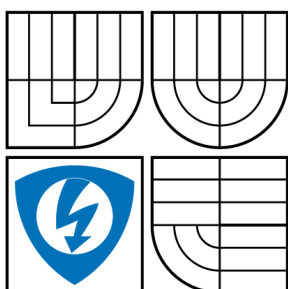


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

# SENZORICKÝ SUBSYSTÉM PRO VENKOVNÍ ROBOT

SENSORY SUBSYSTEM FOR OUTDOOR ROBOT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

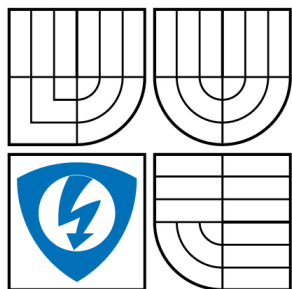
AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

MARTIN SKÁCEL

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

doc. Ing. LUDĚK ŽALUD, Ph.D.

BRNO 2008



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav automatizace a měřicí  
techniky

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor  
Automatizační a měřicí technika

**Student:** Skácel Martin

**ID:** 78427

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2007/2008

**NÁZEV TÉMATU:**

**Senzorický subsystém pro venkovní robot**

**POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

Na základě výsledků semestrálního projektu navrhnete a realizujete senzorické vybavení robotu pro projíždění soustavy zadaných GPS souřadnic. Robot se bude pohybovat v předem neznámém prostředí, v lehkém a středně těžkém terénu.

**DOPORUČENÁ LITERATURA:**

**Termín zadání:** 1.2.2008

**Termín odevzdání:** 2.6.2008

**Vedoucí práce:** doc. Ing. Luděk Žalud, Ph.D.

**prof. Ing. Pavel Jura, CSc.**  
*předseda oborové rady*

**UPOZORNĚNÍ:**

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

## **A n o t a c e**

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem a realizací senzorického vybavení robotu pro projíždění soustavy zadaných GPS souřadnic. Toto senzorické vybavení je tvořeno snímači pro měření okolí robotu a snímači měřící parametry vlastního robotu. Dále je doplněno o vlastní řídicí jednotku, obstarávající získávání dat ze senzoru a předávání těchto dat ostatním systémům robotu. Toto senzorické vybavení je navrženo jako modulární, aby byla zaručena jednoduchost rozšíření o další senzory.

## **K l í ě o v á   s l o v a**

robot, senzor, senzorický subsystém, senzorické vybavení

## **A n n o t a t i o n**

This bachelor thesis deals with designing and implementation of sensorial equipment of a robot which travels according to set GPS. This sensorial equipment is designed with using sensors for measuring robot surroundings and robot parameters. This equipment includes an instruction control unit, which gains data from the sensors and transfers the data to the other systems of the robot. This sensorial equipment is designed as modular for assuring an easy expansion with other sensors.

## **K e y w o r d s**

robot, sensor, sensory subsystem, sensorial equipment

## **Bibliografická citace**

SKÁCEL, M. *Senzorický subsystém pro venkovní robot*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 50 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Luděk Žalud, Ph.D.

## **P r o h l á š e n í**

„Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma "Senzorický subsystém pro venkovní robot" jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.“

V Brně dne :

Podpis:

## **P o d ě k o v á n í**

Děkuji tímto doc. Ing. Luděkovi Žaludovi za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce.

V Brně dne :

Podpis:

## **OBSAH**

<b>1. ÚVOD .....</b>	<b>8</b>
<b>2. SENZORY A METODY MĚŘENÍ .....</b>	<b>9</b>
2.1 Interní senzory.....	9
2.1.1 Senzory natočení.....	9
2.1.2 Otáčkoměry .....	12
2.1.3 Akcelerometr .....	13
2.2 Externí senzory .....	16
2.2.1 Taktilní senzor .....	16
2.2.2 Infračervený senzor .....	17
2.2.3 Ultrazvukový senzor.....	17
2.2.4 Kompas.....	19
2.2.5 Lidar.....	22
<b>3. BLOKOVÉ SCHÉMA ŘEŠNÍ SENZORICKÉHO SUBSYSTÉMU</b>	
<b>ROBOTU.....</b>	<b>24</b>
<b>4. POPIS POUŽITÉHO HARDWARE.....</b>	<b>25</b>
4.1 Ultrazvukový dálkoměr.....	25
4.2 Elektronický kompas.....	27
4.3 Akcelerometr.....	29
4.4 realizace řídicí jednotky senzorického subsystému .....	33
4.4.1 Požadavky na HW řídicí jednotky .....	33
4.4.2 Realizace řídicí jednotky .....	34
<b>5. SOFTWARE ŘÍDÍCÍ JEDNOTKY.....</b>	<b>37</b>
5.1 Nastavení a obsluha I <sup>2</sup> C .....	37
5.2 Nastavení jednotky USART .....	37
5.3 Nastavení a obsluha A/D převodníku .....	38
<b>6. ELEKTRONICKÉ VYVÁŽENÍ KOMPASU .....</b>	<b>39</b>
<b>7. ZÁVĚR.....</b>	<b>41</b>
<b>8. LITERATURA .....</b>	<b>42</b>

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Vzor disku .....	10
Obrázek 2: Průběh výstupních signálů z IRC snímače .....	10
Obrázek 3: Konstrukce absolutních pulsních snímačů úhlu; a) snímač s binárním kódem, b) snímač s Grayovým kódem.....	12
Obrázek 4: Struktura senzoru bez působení zrychlení ( 0 g) .....	15
Obrázek 5: Struktura senzoru při působení zrychlení .....	15
Obrázek 6: Časový průběh budícího napětí jednosystémového měniče.....	18
Obrázek 7: Vyzařovací charakteristika .....	18
Obrázek 8: Způsob rozmístění ultrazvukových senzorů .....	19
Obrázek 9: Zkreslení měření vzdálenosti na rozhraní.....	19
Obrázek 10: Dvouosý fluxgate senzor .....	21
Obrázek 11: Kolize s nízkou překážkou při zatačení.....	23
Obrázek 12: Blokové schéma senzorického subsystému.....	24
Obrázek 13: Ultrazvuk SRF08 a jeho vstupy .....	25
Obrázek 14: Elektronický kompas CMPS03 a jeho vstupy .....	28
Obrázek 15: Akcelerometr .....	29
Obrázek 16: Složky gravitačního zrychlení působící na osu X a Z .....	30
Obrázek 17: Nelinearita výstupu os X, Y, Z.....	31
Obrázek 18: Vymezení úhlů a složek gravitačního zrychlení.....	32
Obrázek 19: Schéma obvodu řídicí jednotky senzorického subsystému .....	34
Obrázek 20. Osazená deska centrální jednotky.....	35
Obrázek 21: Složky magnetického pole [7] .....	39



## SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Registry ultrazvukového dálkoměru SRF08 .....	26
Tabulka 2: Příkazy ultrazvukového dálkoměru SRF08 .....	27
Tabulka 3: Registry elektronického kompasu používané při I <sup>2</sup> C komunikaci.....	28
Tabulka 4: Základní vlastnosti akcelerometru MMA7260 .....	29
Tabulka 5: Nastavení měřicího rozsahu akcelerometru .....	30
Tabulka 6: Přehled připojených senzorů a periférií .....	33
Tabulka 7: Závislost šíření zvuku na teplotě okolního prostředí .....	36

## 1. ÚVOD

Robot svoje okolí vnímá pomocí senzoru. Senzorický systém je jediný prostředek k získání popisu okolí. Tento systém zachytí skutečný stav prostředí v okolí robotu a transformuje získané informace na veličiny, které jsou vhodné pro vytvoření vnitřní reprezentace okolí.

Před návrhem senzorického vybavení je nutné zvážit mnoho faktorů zohledňující nejen vlastnosti senzorů, ale také pracovní prostředí robotu, možnosti vzájemné interakce senzorů, nároky na výpočtové možnosti řídicího systému.

Mezi nejjednodušší senzory lze zařadit senzory pro zjištění přítomnosti překážek před robotem (jako jsou zdi nebo jiné větší překážky), elektronický kompas pro určení natočení robotu k referenčnímu souřadnému systému prostředí, inkrementální snímače natočení poskytující informaci o skutečných otáčkách pohonů a akcelerometrem pro zjištění náklonu robotu. U složitějších robotů, kdy je robot rozdělen na několik řídicích celků, je senzorické vybavení zahrnuto v senzorickém subsystému robota.

Při návrhu senzorického subsystému je pak vhodné si tuto úlohu rozdělit na dvě základní části:

- senzory (receptory), které snímají fyzikální signály z prostředí a převádí je na vhodné vnitřní signály,
- centrální řídicí systém senzorického subsystému, který zpracovává a vybírá data, s důležitou informací pro robota a předává tyto informace ostatním subsystémům robota (např. hlavní řídicí jednotce).

Aby ostatní subsystémy byly schopny reagovat na změny prostředí, musí mu senzory poskytovat potřebné informace včas s požadovanou přesností a spolehlivostí.

## 2. SENZORY A METODY MĚŘENÍ

Senzory lze dělit na interní a externí. **Interní senzory** zjišťují interní parametry vlastního robotického systému, například polohu a rychlost robotu, stav vybití baterií, atd. **Externí senzory** měří okolní svět robotu: rozměry, tvar, barvu a další fyzikální vlastnosti objektů v prostředí a obecné vlastnosti samotného prostředí (teplotu, zvuk, přítomnost různých chemických látek, ...). Dále pak externí senzory mohou zjišťovat charakteristiky fyzikálních polí (elektromagnetické, magnetické, gravitační, ...). Ostatní typy senzorů jsou specifikovány podle požadavků konkrétního využití robotu. Externí senzory můžeme dále dělit na kontaktní, tj. takové, které se při své činnosti dotýkají okolních objektů (např. nárazníky, taktilní receptory) a bezkontaktní. K bezkontaktním čidlům patří například sonarové a laserové dálkoměry nebo kamery. Další dělení senzorů je na aktivní a pasivní. Aktivní senzory vysílají do prostředí energii nebo své okolí nějakým způsobem mění. Naproti tomu pasivní čidla pouze energii pasivně přijímají. Příkladem pasivního čidla je kamera, kdežto laserový dálkoměr, který vysílá laserový paprsek a měří dobu jeho letu je aktivní.

### 2.1 INTERNÍ SENZORY

Interní senzory poskytují robotu informace o jeho subsystémech. Lze je rozdělit na **diagnostické** – podávající robotu informace o stavu baterií, teplotě součástí, a na **navigační** – sloužící k zjišťování polohy a rychlosti jednotlivých pohonů, nebo výstupních členů. Na základně interních navigačních senzorů je robot schopen si vytvořit mapu ujeté trasy.

#### 2.1.1 Senzory natočení

##### 2.1.1.1 Inkrementální enkodéry

Optická rotační inkrementální čidla (IRC) slouží k převodu mechanického rotačního pohybu na elektrické signály.

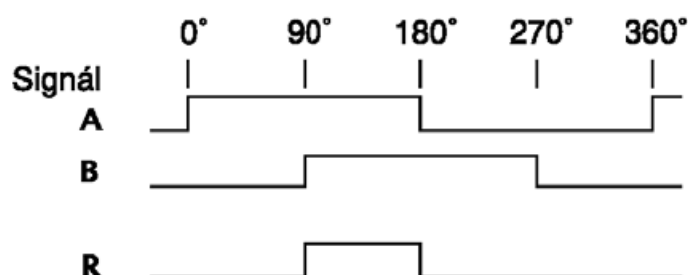
Jádrem klasických optických inkrementálních snímačů je tzv. pulsní disk vyráběný z různých materiálů. Tento disk je mechanicky spojen s hřídelí procházející

zpravidla osou enkodéru. Disk obsahuje světlá a tmavá pole. Světlo generované kvalitními diodami, pracujícími většinou v infračervené oblasti spektra, prochází přes membránu a tento pulsní disk a je zachyceno fotodetektozem umístěným z jeho druhé strany.



**Obrázek 1: Vzor disku**

Při otáčení hřídele pak disk střídavě světlo propouští a nepropouští (zacloňuje fotodetektor). Tyto světelné pulsy jsou dále zpracovány elektronikou snímače a převedeny na výstupní elektrický signál zpravidla obdélníkového nebo sinusového typu. Počet tmavých (neprůhledných) a světlých (průhledných) polí odpovídá počtu pulsů na jednu otáčku, což je jeden z nejdůležitějších parametrů udávaných u každého inkrementálního snímače. Dnes už se většinou nevyrábí typy mající pouze jeden kanál, tedy jednu stopu na pulsním disku. Standardem jsou snímače 3-kanálové. Signály dvou kanálů jsou vzájemně posunuty o  $90^\circ$ , což umožňuje rozpoznat směr otáčení. Třetí kanál generuje puls jednou za otáčku a zpravidla se nazývá „nulovým pulsem“. Z principu činnosti si inkrementální enkodéry na rozdíl od snímačů absolutních „nepamatují“ polohu při vypnutí napájení.



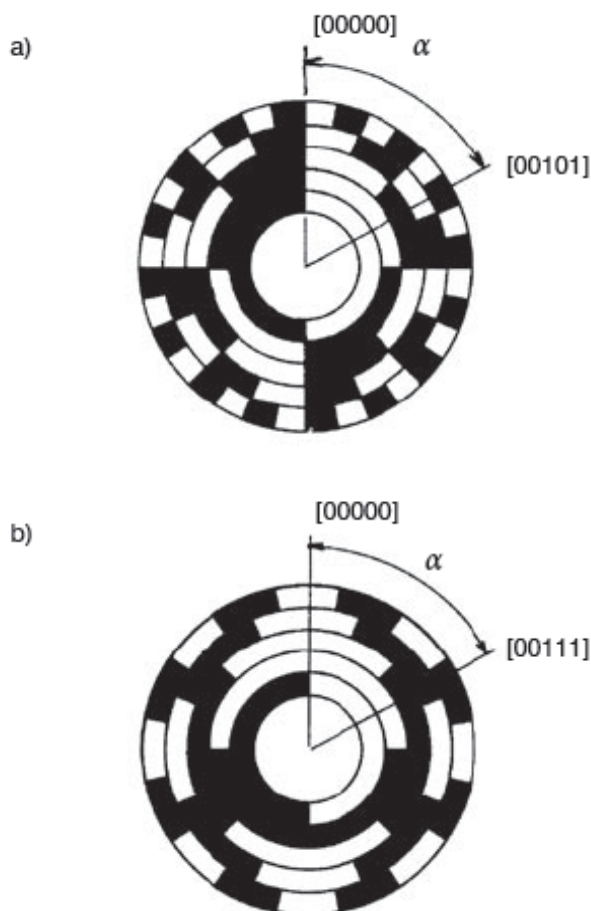
**Obrázek 2: Průběh výstupních signálů z IRC snímače**

K jeho výhodám patří velká rozlišovací schopnost při relativně nízké ceně. Zásadní nevýhodou je relativní měření a tudíž nutnost inicializace výchozí polohy, a také možnost akumulace chyb při přeskočení značky.

### **2.1.1.2 Absolutní enkodéry**

Absolutní enkodéry se používají v pomalejších aplikacích, ve kterých není dovolena ztráta o pozici natočení v případě výpadku napájení. Tento typ enkodéru využívá komplikovanější kódování než inkrementální a vyžaduje větší počet snímacích prvků. Předností tohoto enkodéru je to, že výstupní hodnota ze senzoru udává absolutní velikost natočení v rozsahu 0 až 360°. Pro větší počet otáček je vybaven čítačem inkrementující počet otáček kódového kotouče. Obsah tohoto čítače pak spolu s kódem aktuální pozice kódového kotouče tvoří absolutní údaj o poloze natočení. [1]

Snímač s binárním kódem je principiálně jednoduchý a lehce srozumitelný, ale prakticky v případě enkodérů nevýhodný. Standardní binární kód je v případě enkodérů velmi náchylný na generování tzv. hazardních stavů, kdy například při přechodu ze binárního stavu 01 na nejbližší následující stav 10 může být na kotouči krátce generován stav 00. Za to může nejen nedokonalé provedení kolečka enkodéru, ale někdy i optické jevy typu odrazu, ohybu nebo stínu světla procházejícího přes kotouč od vysílače (LED) k přijímači (fotodioda).



**Obrázek 3: Konstrukce absolutních pulsních snímačů úhlu; a) snímač s binárním kódem, b) snímač s Grayovým kódem**

Pravděpodobnost náhodných nebo i systematických vzniků hazardů je tím větší, čím víc bitů má kód, tedy čím má enkodér vyšší rozlišení (jemnější dělení kotouče = rozsahu  $360^\circ$ ). Uvedený problém se pak musí vyřešit ve vyhodnocovací elektronice enkodéru.

### 2.1.2 Otáčkoměry

Jedná se o senzory určené k měření rychlosti otáčení. Pro pohony robotu jsou nejčastěji využívány indukční a impulsní otáčkoměry. V indukčním provedení se nejčastěji využívají elektrodynamické otáčkoměry. Podle výstupního napětí se rozlišují na tachodynamy (stejnoseměrné) a tachalternátory (střídavé). Impulsní pracují na měření frekvence zaznamenané značky na kotouči.

Tachodynamo je malý komutátorový motor s permanentními magnety a s výstupním napětím přímo úměrný rychlosti. Měřítkem kvality je zvlnění napětí vlivem konečného počtu lamel komutátoru, tuhost spojení s motorem a moment setrvačnosti rotoru tachodynamu.

Umístění těchto senzorů na pohonu je v případě použití převodovky vhodnější na straně motoru. V nenáročných (co se týče kvality) systémech rychlostního řízení pohonů se stejnosměrnými motory se také používá měření zpětného elektromotorického napětí generovaného motorem, které je přímo úměrné otáčkám.[1]

### 2.1.3 Akcelerometr

Akcelerometry senzory pro měření statického nebo dynamického zrychlení, jsou vhodné nejen pro měření odstředivých a setrvačných sil, ale i pro určování pozice tělesa, jeho naklonění nebo vibrací.

Obecně se dá říci, že se jedná o senzory měřící dynamické zrychlení (akceleraci), resp. sílu vzniklou změnou rychlosti pohybujícího se předmětu resp. senzoru, nebo statické zrychlení, resp. sílu vzniklou působením gravitace (přitažlivostí) Země. Mezi měření dynamického zrychlení patří i detekce vibrací. Statické zrychlení je již ze svého principu neustále přítomné a je ho nutné při měření dynamického zrychlení ve výsledcích odstranit filtrací.

První integrací se získá rychlost objektu, na kterém je akcelerometr umístěn:

$$v(t) = \int_0^t a(t) dt, \quad (1)$$

kde  $a(t)$  je zrychlení a  $v(t)$  rychlost v čase  $t$ . Pro ujetou dráhu  $d(t)$  potom platí, že je integrálem rychlosti:

$$d(t) = \int_0^t v(t) dt = \int_0^t \int_0^t a(t) dt dt. \quad (2)$$

Pro výpočet délky ujeté trajektorie je nutná dvojí integrace.

### ***2.1.3.1 Piezoelektrické akcelerometry***

Piezoelektrické akcelerometry využívají piezoelektrický materiál - krystal, který generuje náboj úměrný mechanickému namáhání způsobenému silou působící na tento krystal. Velikost působící síly je dána velikostí zrychlení a hmotností seismické hmoty podle Newtonova zákona.

Princip spočívá v tom, že jedna strana piezoelektrického krystalu je pevně připevněna k základně senzoru a k protilehlé straně krystalu je připevněna seismická hmota. Jestliže je akcelerometr vystaven zrychlení a (vibracím, akceleraci, otřesům), působí seismická hmota na krystal silou, jejíž velikost je dána součinem zrychlení a hmotností seismické hmoty. Síla, která působí na krystal, způsobuje generování elektrického náboje na výstupu senzoru. Piezoelektrický efekt tak generuje na výstupu náboj  $q$ , úměrný působící síle. Protože seismická hmota má konstantní hmotnost, výstupní signál v podobě náboje je úměrný akceleraci senzoru. Pokud je akcelerometr pevně upevněn k testovanému objektu, měří i jeho zrychlení. Akcelerometr charakterizuje nábojová citlivost:

$$B = \frac{q}{a}. \quad (3)$$

### ***2.1.3.2 Piezorezistivní akcelerometry***

Piezorezistivní akcelerometr je senzor, který využívá piezorezistivní materiál místo piezoelektrického krystalu a jeho prostřednictvím převádí sílu od seismické hmoty na změnu odporu. Piezorezistivní akcelerometry mají výhodu proti piezoelektrickým v tom, že mohou měřit i konstantní zrychlení

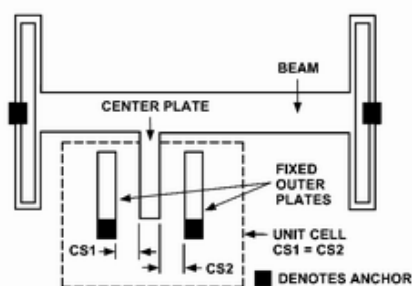
Princip je založen na použití ohybu jednoho konzolového nosníku z piezorezistivního křemíkového materiálu vlivem působícího zrychlení. Ohybem se mění odpor, který je měřen.

### ***2.1.3.3 MEMS akcelerometry***

Princip měření je založen na změně kapacity vnitřního proměnného integrovaného kondenzátoru vlivem působící síly vzniklé zrychlením pouzdra senzoru. Struktura obvodu obsahuje polykřemíkový mikromechanický senzor a technologií BiMOS integrované obvody pro zpracování signálu ze senzoru. Struktura

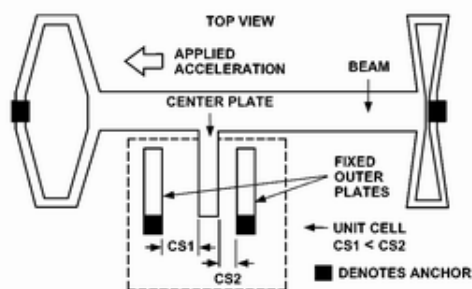


senzoru umožňuje měřit kladná i záporná statická i dynamická zrychlení. Samotný integrovaný senzor je vlastně povrchová mikromechanická polykřemíková struktura (nosník, pružiny, pevné úchyty) "plovoucí" na povrchu křemíkového monokrystalu (viz. obrázek 4). Křemíkové pružiny umožňují pohyb celé mechanické struktury po povrchu monokrystalu a zároveň poskytují mechanický odpor síle vzniklé zrychlením, jak je vidět na obrázku 5.



**Obrázek 4: Struktura senzoru bez působení zrychlení ( 0 g)**

Prohnutí a deformace takové to struktury je převedena na změnu kapacity diferenciálního kondenzátoru. Ten je složen z dvou pevných desek (fixed outer plates) a prostřední desky (central plate) pevně spojené s deformujícím se nosníkem (beam). Diferenciální kondenzátor tvoří dělič pro dva obdélníkové signály stejné amplitudy vzájemně posunuté ve fázi o  $180^\circ$ , které budí jeho pevné desky. Působícím zrychlením dojde k posunutí prostřední desky a tím dojde ke změně dělicího poměru diferenciálního kondenzátoru. Na výstupu se objeví obdélníkový signál o amplitudě úměrné hodnotě zrychlení a fázi, která nese informaci o směru pohybu nosníku, tedy o směru působícího zrychlení. [3]



**Obrázek 5: Struktura senzoru při působení zrychlení**

Největší chyba čidla je způsobena právě jeho konstrukcí, kdy se tělísko nevrátí při nulovém zrychlení přesně do nulové pozice, ale zůstává mírně vychýleno (tzv. drift). Vzhledem k dvojné integraci i malá chyba výrazně snižuje přesnost naměřené trajektorie. Jednou z možností jak eliminovat vliv driftu je kombinovat akcelerometr s jiným senzorem a následné porovnání měření obou senzorů.

## 2.2 EXTERNÍ SENZORY

Používá za účelem mapování překážek v okolí robota, včetně měření vzdálenosti od překážky. Existují 3 základní metody měření:

- snímače založené na měření doby letu signálu (time of flight);
- snímače měřící změnu fáze signálu (phase-shift measurement)
- radary s frekvenční modulací

### 2.2.1 Taktilní senzor

Jedná se o nejjednodušší provedení senzoru, realizovaného kontaktním spínačem. Při kontaktu s překážkou dojde k sepnutí/rozepnutí spínače a uzavření/otevření elektrického obvodu a ke změně logické úrovně, která je dále vyhodnocována. Pro připojení většího počtu spínačů při omezeném počtu binárních vstupů je možné tyto spínače připojit přes multiplexer. Postupným adresováním jeho vstupů, potom testujeme jednotlivé senzory (spínače). Mezi taktilní senzory také patří tenzometry a senzory založené na piezoelektrickém jevu. Taktilních senzorů se využívá tam, kde může dojít ke kontaktu s překážkou či jiným objektem.

**Taktilní antény** jsou zpravidla tvořeny pomocí různě dlouhého dotykového drátu, který má malou ohebnost. Po jemném vychýlení nebo zatlačení na anténu, je sepnut kontakt spínače.

**Taktilní nárazníky** se používají ve formě radlice před robotem. Tato radlice je mechanicky spojena se spínačem, který je v případě nárazu stlačen. Pro přesnější vyhodnocování může být nárazník vybaven více spínači.

Taktilní senzory se umísťují na robota do míst, kde se předpokládá kontakt s překážkou. Může to být přední, či zadní část robota, místa pro tlačení objektů před robotem, či mechanické ruce robota sloužící pro uchopení objektu.

### 2.2.2 Infračervený senzor

Infračervený (IR) senzor detekuje nízkofrekvenční záření. Používá se k detekování překážek v blízkém okolí robotu – řádově desítky centimetrů, sledování čáry a ke komunikaci. Senzor pracuje na bázi odraženého infračerveného světelného paprsku od případné překážky. jako zdroj světla se používá infračervená dioda, což má vliv na vlastnosti a schopnosti senzoru. Jako detektor bývá použit fototranzistor citlivý v infračervené oblasti. Úspěšnost detekce je závislá jak moc povrch materiálu pohlcuje infračervené světlo a jak moc ho odráží zpět k senzoru.

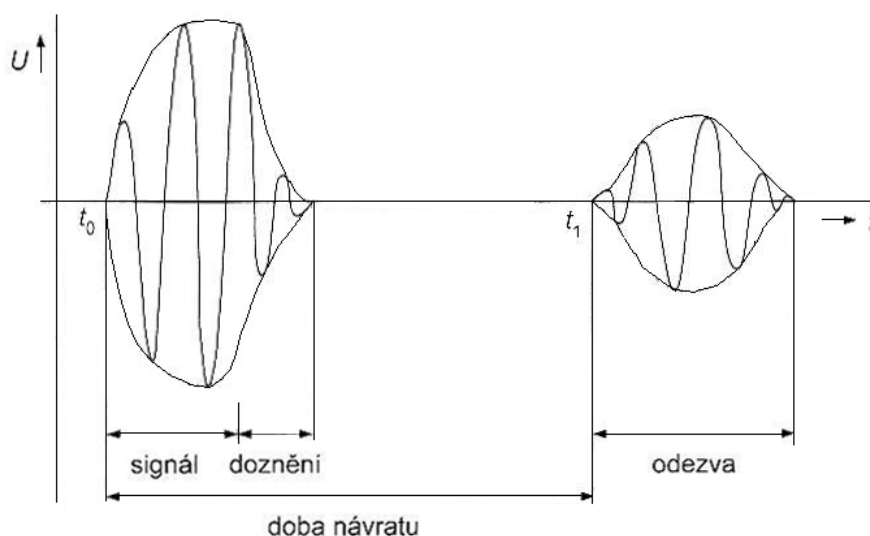
Tento senzor poskytuje dvouhodnotový signál – detekuje odražený IR signál/ nedetekuje odražený signál. Nevýhodou IR senzorů pracujících na detekci odraženého světla je, že množství odraženého světla je závislé na barvě překážky a druhu povrchu.

Pasivní IR senzor využívá pár pyroelektrických elementů reagujících na změnu teploty v infračerveném záření před snímačem. Je schopen detekovat v blízkosti lidí a zvířata před snímačem. Okamžité změny ve výstupu z obou elementů jsou detekovány jako pohyb před snímačem.

### 2.2.3 Ultrazvukový senzor

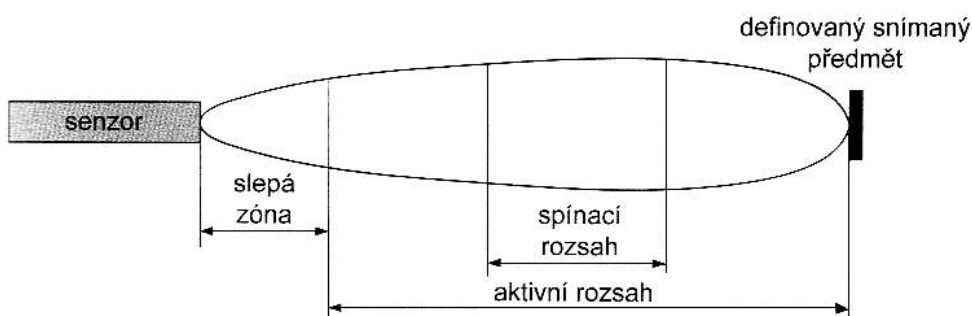
Ultrazvukové senzory pracují na kmitočtu vyšším než je schopno lidské ucho zaznamenat. Ultrazvukové senzory vzdálenosti pracují na principu vysílání krátkých shluků impulzů v oblasti ultrazvukového kmitočtového spektra a příjmu tohoto signálu odraženého lokalizovaným objektem.

Vzdálenost objektu je možno vypočítat pomocí známé rychlosti šíření akustických signálů ve známém prostředí měřením času, který uplyne od okamžiku vyslání signálu až do příjmu odražené vlny. V případě, že prostředím je vzduch, je rychlost šíření akustických vln 345 m/s při teplotě 22 °C. Změny podmínek, za kterých se akustická vlna šíří jsou zdrojem chyb měření.



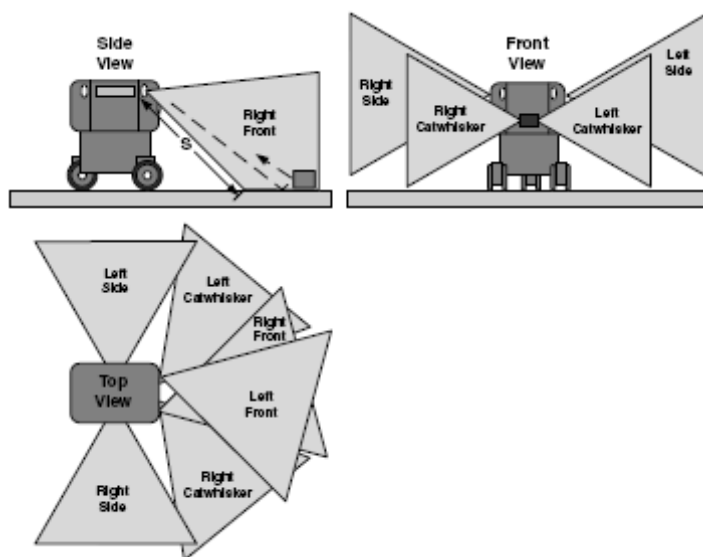
**Obrázek 6: Časový průběh budícího napětí jednosystémového měniče**

Maximální dosah při měření je omezen především vzdušným proděním, který může unášet vzduchové hmoty a tím zeslabit odrazení signál. Nejsilnější signál bývá odražen od překážek, které jsou pevné, hladké a ploché a směřující kolmo k vysílanému svazku. Ultrazvukový senzor pro měření vzdálenosti umožňuje mobilnímu robotu lokalizovat překážky ve vzdálenostech 0,5 m až 6 m.

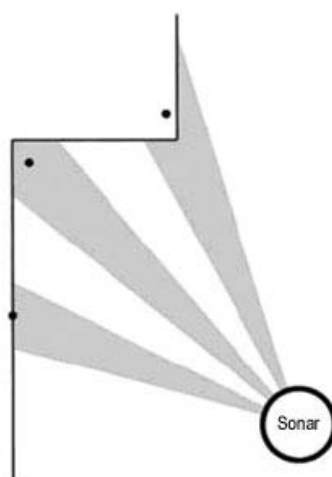


**Obrázek 7: Vyzařovací charakteristika**

Mobilní robot může být vybaven několika takovými snímači. Snímače umísťujeme na přední a zadní panel a po stranách robotu. Další z možností použití ultrazvukového senzoru je jej umístit na otáčející se panel. Spolu s dobou trvání mezi vyslaným a přijatým impulsem je třeba měřit úhel natočení senzoru, z čehož agent vyhodnotí polohu překážky. Je-li opakovací frekvence měření cca 30ms, pak celková minimální doba je 1s pro 36 měření s úhlovým rozlišením 10°.



Obrázek 8: Způsob rozmístění ultrazvukových senzorů [2]



Obrázek 9: Zkreslení měření vzdálenosti na rozhraní [2]

#### 2.2.4 Kompas

K navigaci je možné využít i magnetické pole Země. Pomocí měření magnetického pole Země lze určit hodnotu azimutu. Pro měření magnetických polí se používají magnetometry. Pro mobilní robotiku jsou vhodné pouze ty magnetometry jenž umožňují měřit malé magnetické pole Země. Průměrná síla magnetického pole je 0,5 gausse.

Pokud není zajištěna vodorovná poloha magnetometru, je třeba počítat s tím, že údaj o azimutu může být ovlivněn v závislosti na geografické poloze až o úhel, stejný jako je odchylka od vodorovné polohy (tzv. heeling error). Elektronické kompas, resp. magnetometry můžeme podle způsobu snímání magnetického pole rozdělit do těchto kategorií:

- Mechanické magnetické kompas
- Fluxgate kompas
- Hall-Effect kompas
- Magnetoindukční kompas
- Magnetorezistivní kompas
- Magnetoelastické kompas

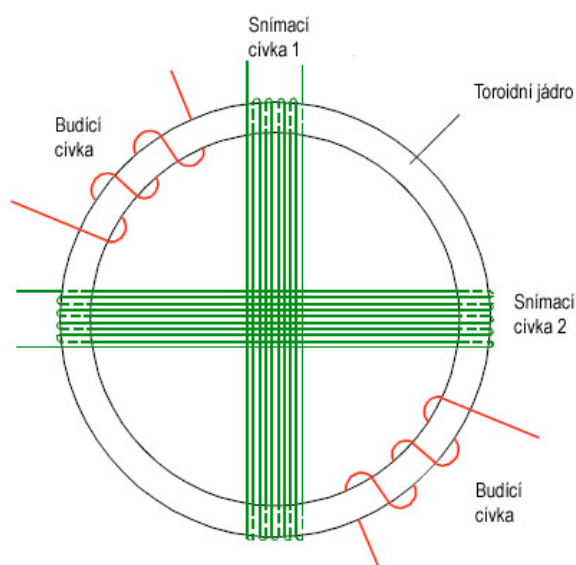
Magnetické pole Země bývá často rušeno elektrickým vedením, přístroji vyzařujícími magnetické pole a často také stíněno železnými prvky. Tyto problémy se projevují hlavně u aplikací uvnitř budov a je možné je částečně omezit použitím jiných senzorů. Také samotný robot získává během výroby díky své kovové konstrukci a elektromagnetickým zařízením (motory, baterie, ...) své vlastní magnetické pole. Kompas pak měří azimut s určitou odchylkou. Pokud je magnetické pole robotu statické, pak je možno tento efekt kompenzovat. Některé elektronické kompas jsou přímo vybaveny funkcí pro kompenzaci (kalibraci) tohoto efektu. V mnoha případech je toto však velmi těžké nebo dokonce nemožné.

#### **2.2.4.1 FLUXGATE KOMPAS**

Fluxgate magnetometry jsou tvořeny dvěma cívkami (primární a sekundární) navinutých okolo jádra z materiálu s vysokou permeabilitou. Magnetická indukce tohoto jádra se pak mění podle velikosti a směru magnetického pole, ve kterém se jádro nachází. Řídící signál s frekvencí zpravidla 10 kHz je připojeno k primárnímu vynutí a nutí jádro oscilovat mezi saturačními body. Ty jsou dány magnetizační křivkou použitého jádra materiálu. Změny permeability jádra vlivem magnetického pole a signálu primárního vynutí ovlivňují amplitudu výstupního signálu sekundárního vinutí.

Další z principů fluxgate magnetometrů je měření změny odporu nasyceného jádra. Změna odporu je způsobena měřeným magnetickým polem. Fluxgate magnetometry umožňují při vhodném zapojení měřit signály od jednotek mikrotésla. Rozsah frekvencí je od statického magnetického pole až do asi 1 kHz.

Obecně se dá říci že fluxgate kompasů jsou pro mobilní robotiku těžké, drahé ale přesné.



**Obrázek 10: Dvouosý fluxgate senzor**

#### **2.2.4.2 MAGNETOINDUKČNÍ KOMPASY**

Pro každou osu máme jednu cívku, která funguje jako indukční část v nízko výkonovém LR oscilátoru. Relativní permeabilita feromagnetického jádra cívky je závislá na magnetickém poli v němž se nachází (tedy také na magnetickém poli Země). Stejnoseměrné napětí udržuje cívku v lineární pracovní oblasti. Pokud je senzor postupně v magnetickém poli natáčen až o  $90^\circ$ , pak se výstupní frekvence oscilátoru může měnit až o 100%. Výstupní frekvence oscilátoru může být měřena přímo mikroprocesorem pomocí compare/capture vstupu. K výhodám magnetoindukčních kompasů patří jednoduchost zapojení a velmi nízká spotřeba.

### 2.2.4.3 MAGNETOREZISTIVNÍ KOMPASY

Magnetorezistivní kompasы využívají magnetorezistivního jevu. Ten spočívá ve změně odporu plátku permalloy (Py) při změně směru magnetického pole. Existují dva typy magnetorezistivních magnetometrů, anisotropie magnetoresistive (AMR) a giant magnetoresistive (GMR). Princip funkce souvisí s kvantovými jevy. AMR magnetometry mají obecně větší citlivost než GMR a proto jsou používány jako čidla v elektronických kompasem

Senzory AMR jsou založeny na tzv. anizotropním magnetorezistivním jevu. Tenký proužek Py vykazuje výraznou magnetickou anizotropii s osou v podélném směru. V tomto směru protéká proužkem elektrický proud. Největší odpor vykazuje materiál pro rovnoběžnou orientaci proudu a magnetizace, nejnižší naopak pro úhel  $90^\circ$  mezi proudem a magnetizací. Charakteristickou vlastností anizotropních magnetorezistivních magnetometrů je nežádoucí flipping efekt. Vlivem rušivých magnetických polí jsou domény materiálu chaoticky natáčeny. Pro správnou funkci AMR magnetometru je však nutné aby všechny domény byly natočeny v jedním směrem k tomu slouží set/reset elektrické impulsy do cívky umístěné v okolí magnetometru. Při provedení proudového impulsu vytvoří cívka magnetické pole daleko větší než měřené magnetické pole Země. Magnetické domény senzory se natočí v jeho směru. Po odeznění se domény opět orientují ve směru magnetického pole Země. Tímto se provede kalibrace snímače pro odstranění vlivu cizích magnetických polí a kovových předmětů v okolí. Výstupní napětí je AMR senzoru je v řádu milivoltů až desítek voltů.

Struktura senzorů založených na GMR je mnohem složitější než struktura AMR. V nejjednodušším případě se jedná o dvě velmi tenké vrstvy feromagnetického materiálu, které jsou odděleny tenkým filmem elektricky vodivé nemagnetické látky. Odpor celé struktury je závislý na úhlu mezi magnetizací horní a solní vrstvy.

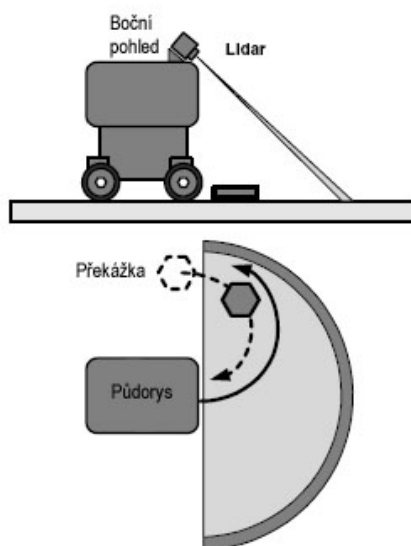
### 2.2.5 Lidar

Laserové senzory pracují na principu měření tvaru laserového paprsku rozmítaného od poloroviny. Průnik této poloroviny s prostředím byl snímán



s kamerou a triangulací byla určena vzdálenost k překážce. Jeden ze způsobů je založen na měření doby šíření světla od senzoru k překážce a zpět, další princip využívá detekci fázového posunu mezi přijímaným a vysílaným paprskem. Nejčastěji se používají rovinné systémy využívající rotačního zrcadla k rozmítání paprsku laseru v oblouku 180° a více. Největší výhodou laserového systému je, že může objevit mnoho pasivních objektů v širokém rozmezí úhlů. Obnovovací rychlost rozmítání je obvykle 1 až 100 Hz. Laserový senzor měřící dobu šíření paprsku se ukazuje jako přesnější. Laserový senzor pracuje rychleji než ultrazvukový senzor. Navíc měření laserovým senzorem je oproti ultrazvuku méně ovlivněno parametry prostředí, jako je proudění vzduchu, vlhkost, teplota. Pomocí laserového snímače snímajícího povrch země před robotem lze i detekovat případné díry, ve kterých by mohl robot uvíznout.

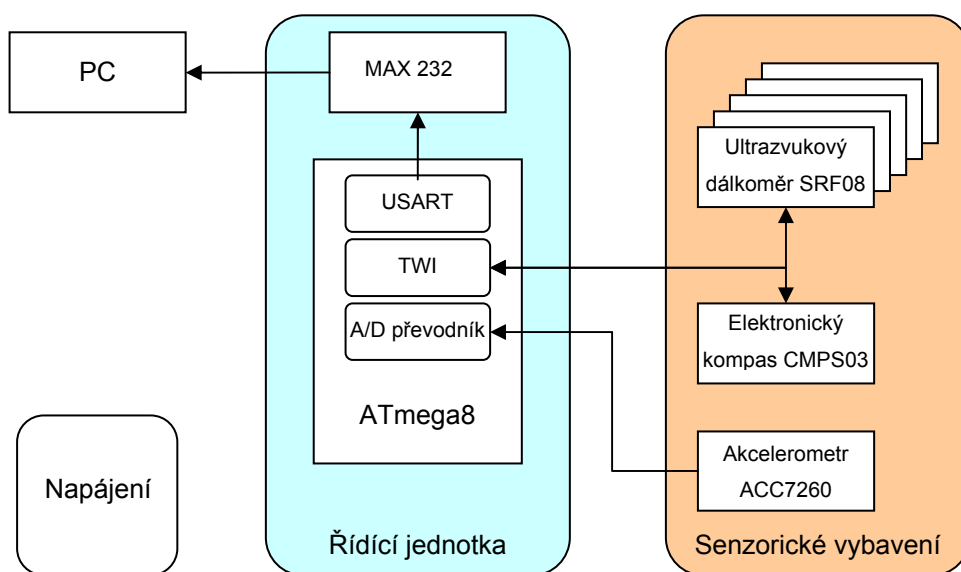
Principiální nevýhodou používaných laserových senzorů je rozmítání paprsku v jedné rovině a tedy nemožnost detekce překážek nižších než je rovina umístění laseru a nesprávná detekce překážek, jejichž tvar se mění s výškou. Z tohoto důvodu je výhodné kombinovat laserové senzory s ultrazvukovými.



**Obrázek 11: Kolize s nízkou překážkou při zatáčení**

### 3. BLOKOVÉ SCHÉMA ŘEŠNÍ SENZORICKÉHO SUBSYSTÉMU ROBOTU

Senzorický subsystém robotu lze obecně rozdělit na dvě části. Senzorickou část a řídicí část. Obě části, lze ještě rozdělit na jednotlivé podbloky. Rozdělení do jednotlivých bloků a podbloků, je znázorněno na obr. 12.



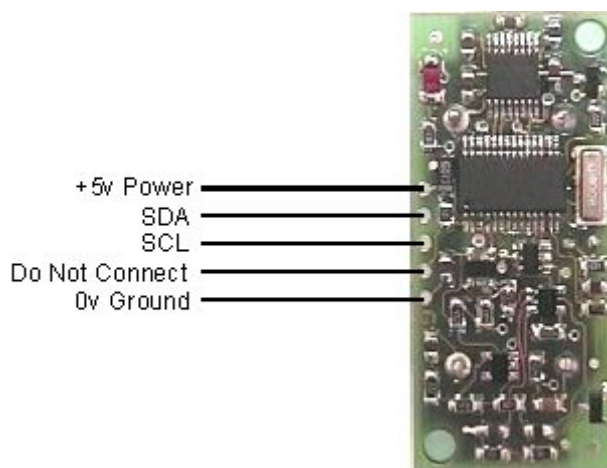
**Obrázek 12: Blokové schéma senzorického subsystému**

Senzorická část je tvořena 5 ultrazvukovými dálkoměry SRF08, které podávají informaci o vzdálenosti překážky, dále elektronickým kompasem CMPS03, který udává úhel pootočení robotu k souřadnému systému prostředí a akcelerometrem ACC7260 poskytující informaci o náklonu robotu.

## 4. POPIS POUŽITÉHO HARDWARE

### 4.1 ULTRAZVUKOVÝ DÁLKOMĚR

Ultrazvukový dálkoměr SRF08 umožňuje měřit vzdálenost 3cm – 6m s vyzařovacím úhlem 55°. Komunikace s řídicí jednotkou je realizována pomocí rozhraní I<sup>2</sup>C. Obvody pro komunikaci pomocí rozhraní I<sup>2</sup>C jsou přímo implementovány na senzoru dálkoměru. Standardní adresa modulu je E0H, kterou lze v případě potřeby měnit na jednu z šestnácti nabízených (E0, E2, E4, E6, E8, EA, EC, EE, F0, F2, F4, F6, F8, FA, FC nebo FE). Kromě toho všechny dálkoměry na I<sup>2</sup>C sběrnici reagují také na adresu 0 (univerzální adresa), takže zasláním příkazu na adresu 0 zahájí všechny připojené moduly měření současně. Výsledky měření musí být přečteny z unikátních individuálních adres připojených modulů. Zápisem příslušného kódu lze přepínat mezi Ranging módem (měření vzdálenosti) a ANN módem (Artificial Neural Network – umělá neuronová síť).



**Obrázek 13: Ultrazvuk SRF08 a jeho vstupy**

Zapisovat lze pouze do registrů 0, 1 a 2. Registr 0 je příkazový registr pro zápis, slouží k zahájení měření. Čtením registru 0 obdržíme verzi software. Doba měření je nastavena na 65ms, ale může být změněna zápisem do registru 2. SRF08 neodpovídá na příkazy na I<sup>2</sup>C během měření. Registr 1 poskytuje při čtení údaje ze senzoru osvětlení. Tato hodnota je obcerstvena při každém měření vzdálenosti, po skončení měření může být přečtena. První odraz je uložen v registrech 2,3, druhý do

4,5 atd. Nula znamená, že nebyl žádný objekt detekován. V dalších registrech je pak až 16 následujících odrazů od vzdálenějších předmětů. Napájení tohoto modulu je 5V/15mA a 3mA ve standby. Do režimu standby je modul automaticky přepnut po skončení měření a vyčkává na další příkaz.

**Tabulka 1: Registry ultrazvukového dálkoměru SRF08**

Adresa registru	Čtení	Zápis
0	Verze software	Příkazový registr
1	Senzor osvětlení	Zesílení
2	1. odraz vyšší byte	Rozsah měření
3	1. odraz nižší byte	N/A
4	2. odraz vyšší byte	N/A
5	2. odraz nižší byte	N/A
~~~~	~~~~	~~~~
34	17. odraz vyšší byte	N/A
35	17. odraz nižší byte	N/A

Měření je zahájeno zapsáním jednoho z příkazů 0x50 až 0x52 do příkazového registru 0. Poté je nutné vyčkat na dokončení měření a pak lze přečíst potřebný počet výsledků. První odraz je uložen v registru 2 a 3, druhý 4 a 5, atd.. Podle zvoleného měření bude vrácený výsledek v palcích, centimetrech nebo mikrosekundách. Pokud některá dvojice obsahuje nulu, tak nejsou další odrazy zaznamenány.

Zápisem do registru 2 lze změnit měřicí rozsah ultrazvukového dálkoměru. Toto je výhodné, chceme-li znát výsledek měření rychleji. Nastavení rozsahu je dáno výrazem:  $(\text{registra}2+1)*43\text{mm}$ . Takže nastavením registru na 24 dostaneme vzdálenost  $(24*43+43)$  1 075mm, přibližně 1m.

Pro snížení rizika zachycení odrazu předchozího měření lze snížit maximální analogové zesílení zápisem do registru 1, takže pozdější a vzdálenější odrazy již nebudou detekovány, ale citlivost k bližším odrazům zůstane zachována. Vhodnou hodnotu zesílení je třeba najít zkusmo, jelikož záleží na dosahu měření, tvaru a materiálu předmětů v okolí.

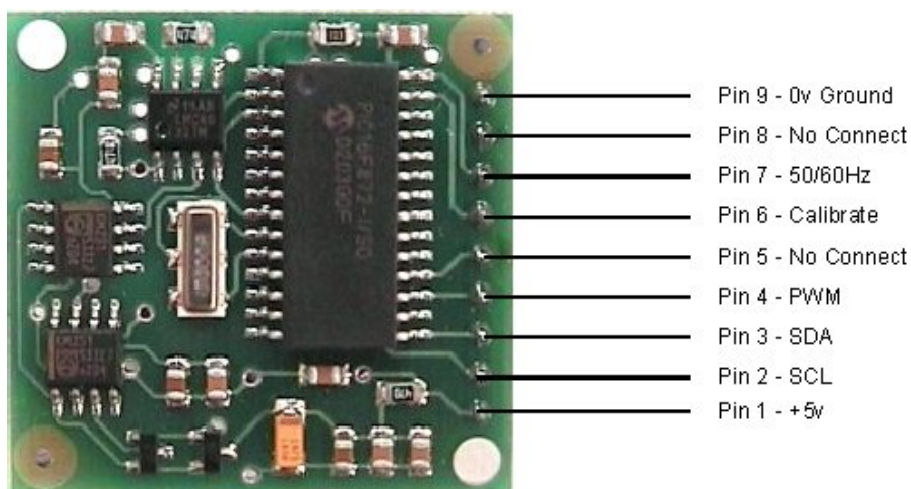
**Tabulka 2: Příkazy ultrazvukového dálkoměru SRF08**

Příkaz	Činnost
0x50	Start měření – výsledek v palcích
0x51	Start měření – výsledek v centimetrech
0x52	Start měření – výsledek v mikrosekundách
0x53	ANN mód – výsledek v palcích
0x54	ANN mód – výsledek v centimetrech
0x55	ANN mód – výsledek v mikrosekundách
0xA0	Sekvence pro změnu adresy modulu
0xAA	
0xA5	

## 4.2 ELEKTRONICKÝ KOMPAS

Elektronický kompas je realizován pomocí modulu CMPS03 využívající senzory KMZ51 od firmy Philips, které jsou navzájem pootočený o 90°. Dále obsahuje podpůrnou elektroniku pro zpracování signálu ze senzoru KMZ51. Měřicí rozsah senzoru KMZ51 je  $\pm 200 \text{ A/m}$  a citlivost  $16 \text{ (mV/V)/(kA/m.)}$ , což je dostačující citlivost k měření magnetického pole země. Ze signálů dvou navzájem kolmých senzorů lze vypočítává směr horizontální složky geomagnetického pole země. Napájení tohoto modulu je 5V/20mA. Informaci o azimutu lze získat dvěma způsoby: z šířkově modulovaného signálu na vývodu 4 nebo přes I<sup>2</sup>C interface na vývodech 2 a 3 z registru 1 jako byte nebo z registru 2, 3 jako word. .

Před nasazením je třeba modul správně kalibrovat v daných podmínkách.. Tuto kalibraci je možné provést pomocí I<sup>2</sup>C. Spočívá v zápisu FFH do vnitřního registru 15 při natočeném kompasu postupně na sever, východ, jih a západ.



**Obrázek 14: Elektronický kompas CMPS03 a jeho vstupy**

CMPS03 komunikuje po sběrnici I<sup>2</sup>C obdobným protokolem, jako EEPROM typu 24C04. První je odeslán start-bit, poté adresa modulu s nejnižším bitem nula (C0 hexadecimálně, 192 dekadicky), poté adresa registru, který chceme přečíst. Následuje opakovaný start-bit, adresa modulu s nejnižším bitem jedna (C1 hexadecimálně, 193 dekadicky). Nyní můžeme přečíst jeden nebo dva byte z adresovaného registru. Pokud je registr 16bitový, čte se jako první významnější byte.

**Tabulka 3: Registry elektronického kompasu používané při I<sup>2</sup>C komunikaci**

Registr	Význam
0	Verze software
1	Azimut jako byte, 0-255 odpovídá úhlu 0-360°
2,3	Azimut jako word, 0-3599 odpovídá úhlu 0-359.9°
4,5	Vnitřní test – diferenční signál senzor 1 – 16 bit signed word
6,7	Vnitřní test – diferenční signál senzor 2 – 16 bit signed word
8,9	Vnitřní test – Kalibrační hodnota 1 – 16 bit signed word
10,11	Vnitřní test – Kalibrační hodnota 2 – 16 bit signed word
12,13,14	Nepoužito
15	Příkaz ke kalibraci – zápisem 255 se zahájí kalibrace

### 4.3 AKCELEROMETR

Modul ACC7260 je tříosý akcelerometr. Umožňující přepínat měřicí rozsahy  $\pm 1,5g$ ,  $\pm 2,0g$ ,  $\pm 4,0g$ ,  $\pm 6,0g$  s napájecím napětím 5V/0,6mA. Použitý senzor MMA7260 od firmy Freescale je doplněn o filtrační RC články a stabilizátor napájecího napětí senzoru na 3,3V. Senzor je vybaven teplotní kompenzací, takže lze měřit v teplotním rozsahu -40 až 105 °C.



**Obrázek 15: Akcelerometr**

Výstupním signálem akcelerometru je napětí, jehož hodnota je úměrná zrychlení v příslušné ose X, Y a Z. Při nulovém zrychlení je na výstupu senzoru polovina napájecího napětí senzoru, tj. 1,65V. Samotný senzor má již z výroby nastavenou nulovou hladinu a zlomový kmitočet filtru.

#### **Tabulka 4: Základní vlastnosti akcelerometru MMA7260**

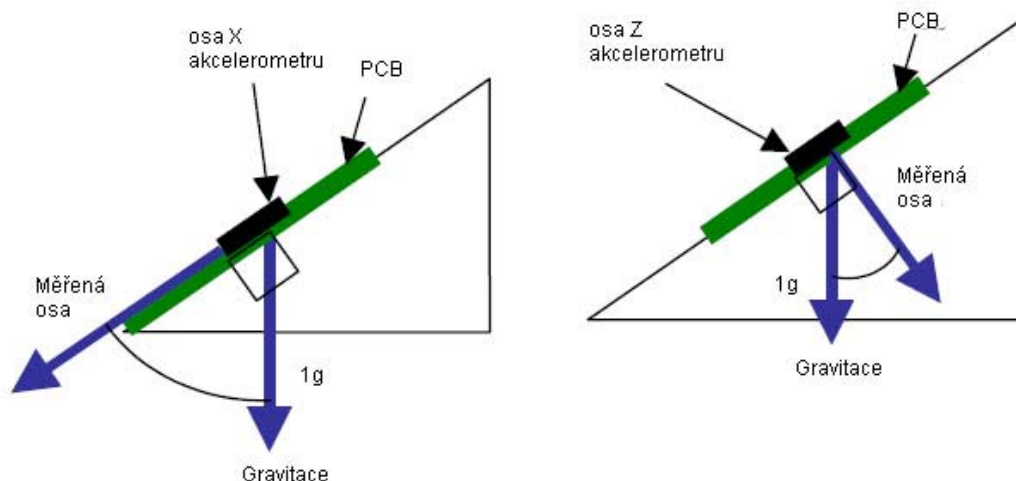
Měřicí rozsah:	1.5g / 2g / 4g / 6g volitelný vstupy g-Select
Maximální citlivost:	800mV/g v rozsahu 1.5g
Nelinearita:	+/- 1% z rozsahu
Křížová citlivost:	5%
Spotřeba:	500μA, sleep módu 3μA
Napájecí napětí:	2.2 až 3.6 V
Pracovní teplota:	-40 až 105°C

Na vstupy G1 a G2 lze přivedením příslušné logické úrovně přepínat mezi měřicími rozsahy. Tak lze mechanicky měnit jeho detekční citlivost a tedy i funkci zařízení, aniž by bylo nutné měnit parametry v programu. Výhodou akcelerometru je i jeho malá spotřeba, zvláště při bateriovém napájení robotu.

**Tabulka 5: Nastavení měřicího rozsahu akcelerometru**

G1	G2	Rozsah	Citlivost [mV/g]
0	0	$\pm 1.5g$	800
1	0	$\pm 2.0g$	600
0	1	$\pm 4.0g$	300
1	1	$\pm 6.0g$	200

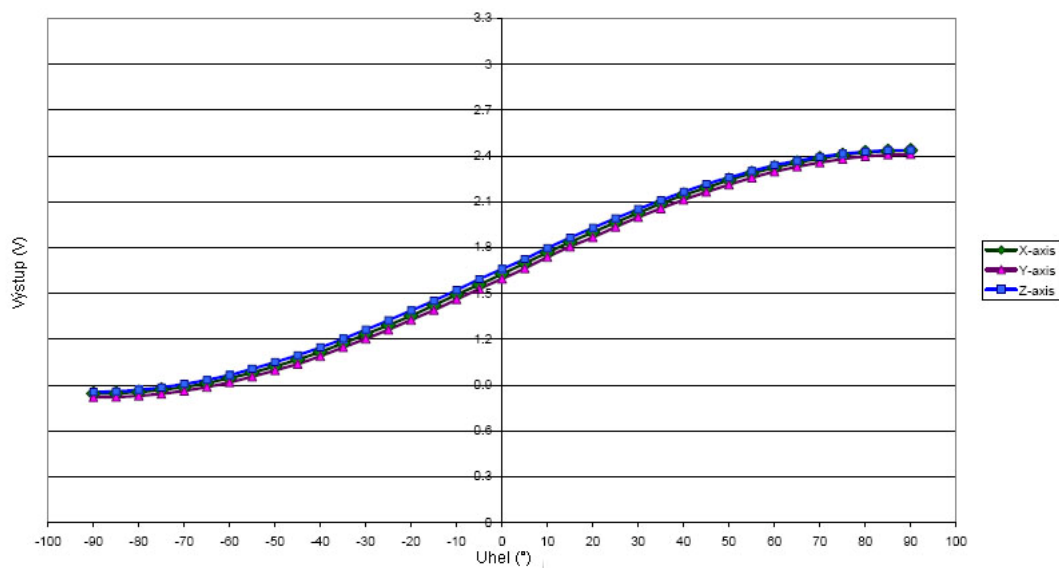
Pro výpočet úhlu náklonu je nutné znát jednotlivé složky gravitačního zrychlení v jednotlivých měřených osách X, Y a Z, jak je uvedeno na obrázku 16.



**Obrázek 16: Složky gravitačního zrychlení působící na osu X a Z**

Na obrázku 17 je uvedena nelinearita výstupního napětí akcelerometru v závislosti na náklonu od  $-90^\circ$  do  $+90^\circ$  s gravitačním zrychlením vodorovném s osou Z při nulovém náklonu. Jelikož charakteristika není celé své šířce lineární, tak nejmenší chybovosti při měření náklonu se dopustíme v lineární části charakteristiky, což odpovídá  $-45^\circ$  do  $+45^\circ$ . Rozdíly mezi jednotlivými osami jsou způsobeny rozdílnými výstupními napětím při působení  $0g$ .





**Obrázek 17: Nelinearita výstupu os X, Y, Z**

Pro výpočet úhlu náklonu musíme znát jednotlivé složky zrychlení v daných osách X, Y, Z. Pro zrychlení v měřené ose lze odvodit následující vzorec:

$$A = \frac{V_{OUT} - V_{OFFSET}}{\frac{\Delta V}{\Delta g}} \quad (4)$$

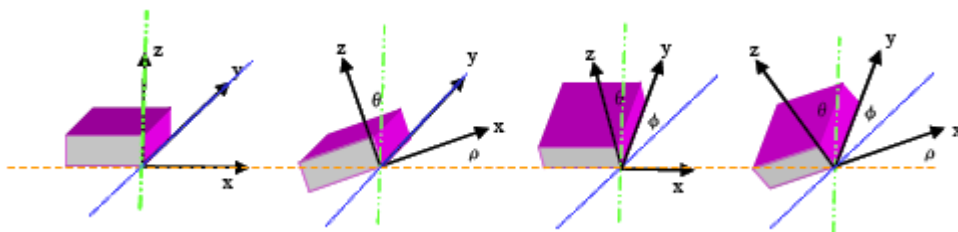
kde  $V_{OUT}$  je výstupní napětí akcelerometru,

$V_{OFFSET}$  je výstupní napětí při 0g,

$\frac{\Delta V}{\Delta g}$  je citlivost,

$A$  je zrychlení v měřené ose.

Při měření náklonu robotu tříosým akcelerometrem, lze použít všechny tři osy akcelerometru, pro získání všech složek zrychlení. Úhel  $\rho$  vymezuje úhel mezi osou X a Zemským povrchem, úhel  $\varphi$  vymezuje úhel mezi osou Y a Zemským povrchem a úhel  $\theta$  je úhel mezi osou Z a gravitační silou.



**Obrázek 18: Vymezení úhlů a složek gravitačního zrychlení**

Pro jednotlivé úhly náklonu robota lze pak psát následující rovnice:

$$\rho = \arctg \left( \frac{A_x}{\sqrt{A_y^2 + A_z^2}} \right) \quad (5)$$

$$\varphi = \arctg \left( \frac{A_y}{\sqrt{A_x^2 + A_z^2}} \right) \quad (6)$$

$$\theta = \arctg \left( \frac{\sqrt{A_x^2 + A_y^2}}{A_z} \right) \quad (7)$$

Zároveň se výsledná suma zrychlení všech os musí rovnat statickému zrychlení 1g.

$$\sqrt{A_x^2 + A_y^2 + A_z^2} = 1g \quad (8)$$

Pro práci robota bude stačit počítat pouze odklon od zemského povrchu, což odpovídá úhlům  $\rho$  a  $\varphi$ . Na základě těchto úhlů jsme schopni provést korekci elektronického kompasu, případně zastavit robota, kdyby hrozilo jeho převrácení.

Pomocí uvedených rovnic si lze v programu vytvořit tabulku s hodnotami napětí odpovídající předozadnímu a bočnímu náklonu robota. Vznikne tak jednoduchý měřič náklonu ve všech osách robota.

## 4.4 REALIZACE ŘÍDÍCÍ JEDNOTKY SENZORICKÉHO SUBSYSTÉMU

### 4.4.1 Požadavky na HW řídicí jednotky

Řídicí jednotka musí obsluhovat připojené senzory v reálném čase a zároveň poskytovat jejich data vyšší úrovni řízení. Následující tabulka obsahuje přehled připojených senzorů a periférií k centrální jednotce.

**Tabulka 6: Přehled připojených senzorů a periférií**

Název	Komunikační rozhraní
Ultrazvukový dálkoměr	I <sup>2</sup> C
Elektronický kompas	I <sup>2</sup> C
Akcelerometr	vstup A/D převodníku
Termistor	vstup A/D převodníku
Vyšší úroveň řízení	UART
Programátor mikrokontroléru	SPI

Při volbě mikrokontroléru pro řídicí jednotku je nutné zohlednit podporu daných komunikačních rozhraní, tak aby nedocházelo k problémům při komunikaci a nízkou spotřebu pro napájení z akumulátorů. Komunikační rozhraní budou na desce centrální jednotky připojeny pomocí konektorů standardizovaných v rámci této práce.

Na základě této analýzy byl zvolen mikrokontrolér ATmega8 od firmy Atmel. Mikrokontrolér ATmega8 je nízkopříkonový 8bitový založený na rozšířené architektuře AVR RISC.

#### **Základní vlastnosti mikrokontroléru ATmega8:**

- instrukční soubor se 130 instrukcemi,
- 32 8bitových registrů,
- paměť programu FLASH 8KB,
- datová paměť RAM 1KB,
- datová paměť EEPROM 512B,

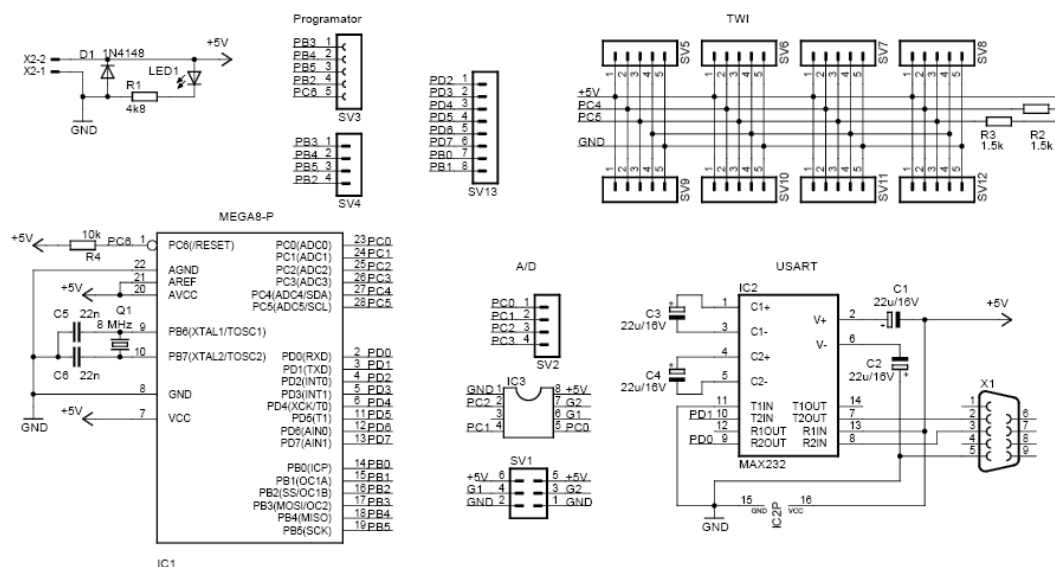
- dva 8bitové čítače/časovače a jeden 16bitový,
- tři PWM kanály,
- 10 bitový A/D převodník,
- jednotky USART, SPI, TWI (podpora I2C), WDT,
- zabudovaný RC oscilátor.

Pro řídicí jednotku senzorického vybavení jsou především využívány komunikační periferie a převod analogového signálu na digitální.

#### 4.4.2 Realizace řídicí jednotky

Řídicí jednotka senzorického subsystému je realizována pomocí mikrokontroléru AVR ATmega8, který je osazen na samostatné desce plošného spoje. Celkové schéma řídicí jednotky je uvedeno na obr. 19. Deska je osazena vlastním zdrojem hodinového signálu, vstupy/výstupy pro rozhraní I<sup>2</sup>C, vstupem pro A/D převodník, programovacím vstupem ISP a výstupem na sériovou linku RS232.

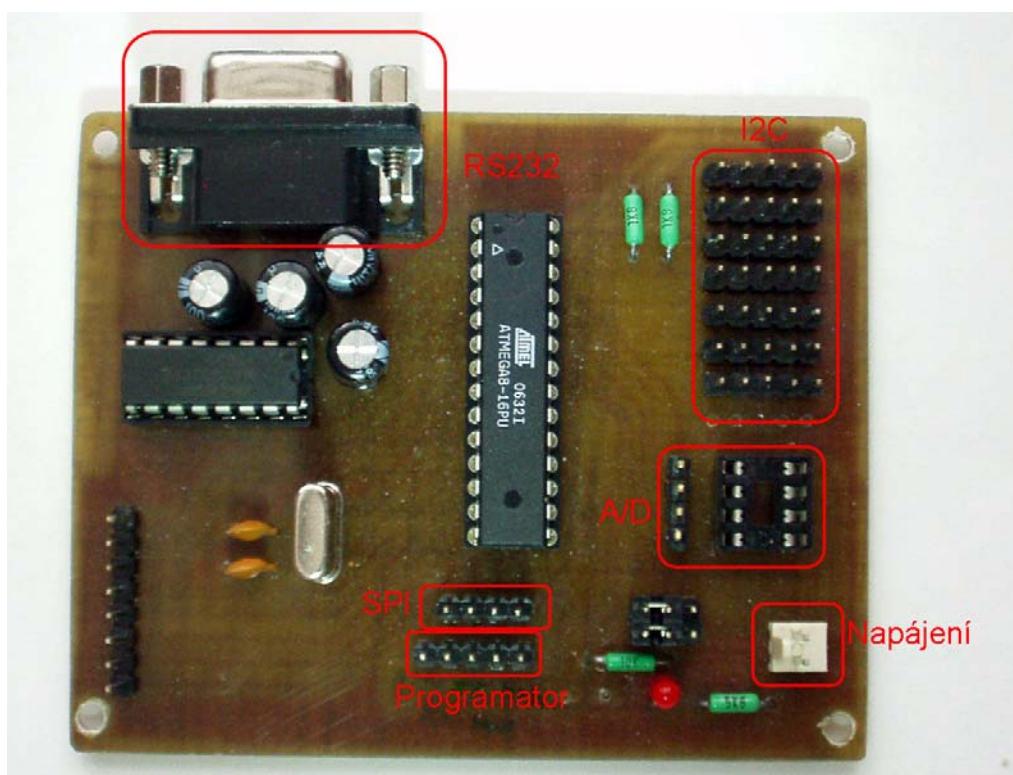
Napájení desky je realizováno pomocí +5V pomocí konektoru X2, ten zároveň zabraňuje otočení polarity napájení, které by vedlo ke zničení připojených senzorů. Z důvodu větší bezpečnosti proti otočení napájení je ke vstupu paralelně připojena dioda D1 v závěrném směru. Toto řešení ovšem vyžaduje proudovou ochranu napájecího zdroje. Při přivedení napájecího napětí svítí indikační LED1.



Obrázek 19: Schéma obvodu řídicí jednotky senzorického subsystému

Deska je navržena tak, aby bylo možné programovat mikrokontrolér přímo na desce senzorického subsystému. Pro programování slouží vstup SV5, na který jsou přivedeny signály /RESET, SS, SCK, MISO, MOSI. Pro programování signál SS není potřeba. Pro programování lze použít jednoduchý programátor uvedený v příloze 5, který propojuje sériový port PC a programovací vstup mikrokontroléru pro sériový download, aniž by bylo nutné odpojovat mikrokontrolér na centrální jednotce.

Rozhraní I<sup>2</sup>C (ozn. firmy Atmel TWI) je vyvedena na konektorech SV5-SV12. Rezistory R2, R3 jsou pull-up rezistory rozhraní I<sup>2</sup>C, jejich hodnota je stanovena podle katalogového listu pro mikrokontrolér ATmega8 pro komunikační rychlost rozhraní I<sup>2</sup>C při 100 kHz. Při pohledu na desku ze strany součástek, kdy konektor X1 směřuje nahoru, jsou jednotlivé vstupy v tomto pořadí zleva: +5V, SDA, SCL, nezapojen, GND. Toto rozmístění odpovídá vstupům ultrazvukového dálkoměru SRF08.



Obrázek 20. Osazená deska centrální jednotky

Vstupy A/D převodníku jsou vyvedeny na konektorech SV2 a IC3. Konektor IC3 slouží pro připojení akcelerometru ACC7260. Nastavení zesílení akcelerometru ACC7260 lze nastavit pomocí jumperů na pinech SV1. K nevyužitému vstupu A/D převodníku na pinu 4 konektoru SV2 lze připojit termistor pro redukci chyby ultrazvuků způsobenou závislostí rychlosti šíření zvuku v prostředí na okolní teplotě.

Závislost rychlosti šíření zvuku na teplotě lze vyjádřit pomocí vzorce (9) a pro určité teploty je uvedena v tabulce 7. V případě změny teploty okolního prostředí by tak mohlo dojít k špatnému vyhodnocení vzdálenosti od překážky.

$$v = (331,57 + 0,607 \cdot t) \text{ms}^{-1} \quad (9)$$

**Tabulka 7: Závislost šíření zvuku na teplotě okolního prostředí**

Teplota [°C]	Rychlost zvuku [ms <sup>-1</sup> ]
0	331,57
5	334,61
10	337,64
15	340,68
20	343,71
25	346,75
30	349,78
35	352,82

Rx a Tx jednotky USART mikrokontroléru ATmega8 je připojen k převodníku TTL/CMOS, který je realizován obvodem MAX232. Pomocí tohoto obvodu je možné propojení desky senzorického subsystému s PC. Pro komunikaci s jinými mikrokontroléry slouží konektor SV4, na který je připojeno rozhraní SPI. Zbývající zatím nevyužívané rezervní vstupní piny mikrokontroléru jsou vyvedeny na konektoru SV13. Samotná deska plošných spojů je realizována jako jednovrstvá bez součástek SMD v programu Eagle. Navržený plošný spoj je uveden v příloze 2 a seznam použitých součástek v příloze 3.

## 5. SOFTWARE ŘÍDÍCÍ JEDNOTKY

Nezbytnou součástí pro funkčnost řídicí jednotky je její softwarové vybavení realizující získání a úpravu měřených dat a následné předávání ostatním subsystémům robotu. Pro programování mikrokontroléru bylo zvoleno prostředí AVR Studio 4 doplněné o balík WINAVR s kompilátorem AVR GCC pro psaní v jazyce ANSI C. K samotnému nahrání programu do mikrokontroléru byl použit program Ponyprog s využitím programátoru uvedeného v příloze 5.

### 5.1 NASTAVENÍ A OBSLUHA I<sup>2</sup>C

Nastavením registru TWBR podle následujícího vzorce se provede nastavení komunikační rychlosti po I<sup>2</sup>C.

$$TWBR = \frac{\frac{f_{osc}}{f_{SCL}} - 16}{2} \quad (10)$$

$f_{osc}$  – frekvence hodinového signálu mikrokontroléru

$f_{SCL}$  – frekvence sběrnice I<sup>2</sup>C

Pro kmitočet SCL 100 kHz při použití krystalu 8 MHz je hodnota TWBR = 32 a předděličku TWSR = 0.

Pomocí funkce *i2c\_transmit* dojde k zápisu hodnoty do příslušného registru adresovaného zařízení. Vstupy této funkce jsou ukazatele na adresu, registr a hodnotu registru. Naopak pro vyčítání hodnot z registrů u snímačů připojených rozhraním I<sup>2</sup>C slouží funkce *i2c\_read*, která přečte hodnotu registru adresovaného zařízení. Jejimi vstupy je ukazatel na adresu zařízení ze kterého se bude číst a ukazatel na registr, který bude přečten. Výstupem funkce je hodnota přečteného registru.

### 5.2 NASTAVENÍ JEDNOTKY USART

Mikrokontrolér posílá pomocí jednotky USART do PC naměřená data po sériovém kabelu. Pro správnou funkci jednotky USART je nutné provést její inicializaci. Inicializace jednotky USART je provedena pomocí funkce *usart\_init*.

Vstupem funkce je hodnota UBRR získaná rovnicí (11). Dle požadované rychlosti dojde k nastavení potřebných registrů UBRRH, UBRRL a vlastností přenosu v registrech ACSRA, ACSRB a ACSRC.

$$UBRR = \frac{f_{osc}}{16 \cdot BAUD} - 1 \quad (11)$$

$f_{osc}$  – frekvence hodinového signálu mikrokontroléru

BAUD – přenosová rychlost USART v baudech

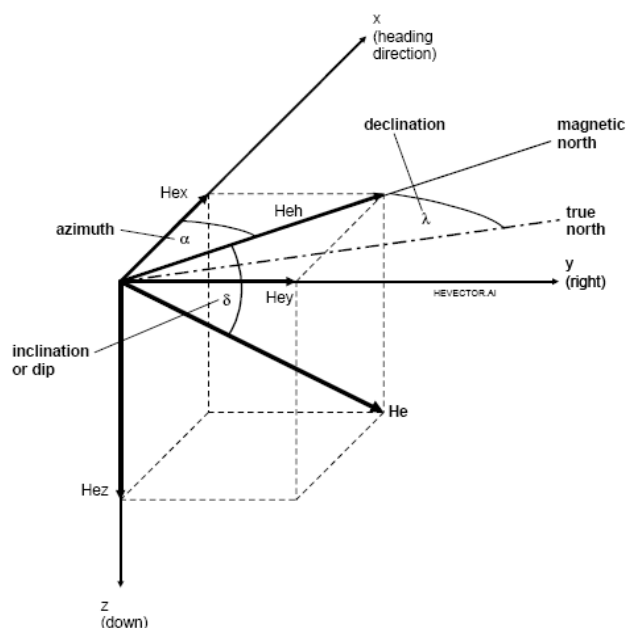
### 5.3 NASTAVENÍ A OBSLUHA A/D PŘEVODNÍKU

Mikrokontrolér ATmega8 je vybaven zabudovaným 10bitovým převodníkem pracujícím s postupnou aproximací. Pro měření vstupních hodnot je nutné aktivovat A/D převodník a nastavit jeho referenční napětí. K tomuto je vytvořena funkce *adc\_init*. Tato funkce nemá žádné vstupy ani výstupy, pouze nastavuje registr ADMUX a ADCSRA. Registr ADMUX je nastaven na hodnotu 0x00, tzn. je vybrán vstup A/D převodníku ADC0, zarovnání výsledku A/D převodníku doprava a použití referenčního napětí ze vstupu AREF. V registru ADCSRA jsou nastaveny do log. 1 bity ADEN, ADSC, ADATE, ADPS2, ADPS1, ADPS0 a ADIF. Pro měření hodnoty na vstupech A/D převodníku slouží funkce *adc\_read*, jejím vstupem je ukazatel na kanál A/D převodníku a výstupem je přečtená hodnota na zvoleném kanálu.



## 6. ELEKTRONICKÉ VYVÁŽENÍ KOMPASU

Magnetické pole Země je fyzikální veličina, kterou vyhodnocuje kompas k určení azimutu. Pro správné určení azimutu je nutné znát horizontální složku magnetického pole, která je kolmá na gravitační sílu a směřuje k magnetickému severu Země. Jednotlivé složky magnetického pole Země jsou znázorněny na obrázku 21. V horizontální ose X lze měřit horizontální složku magnetického pole  $H_{ex}$  ve směru pohybu, v ose Y lze měřit horizontální složku magnetického  $H_{ey}$  pole působící kolmo na směr pohybu. Vektor  $H_{eh}$  je horizontální složka magnetického pole a je kolmá ke gravitaci. Azimut je pak úhlem mezi směrem pohybu a horizontální složkou  $H_{eh}$ . Declination vyjadřuje úhel mezi vektorem horizontální složky magnetického pole a směrem ukazující skutečný geografický sever. Tato hodnota je závislá na geografické poloze pohybuje se v rozmezí  $\pm 25$  stupňů. Inclination vyjadřuje úhel mezi vektorem magnetického pole Země a vektorem horizontální složky. Inclination je na geomagnetickém rovníku roven  $0^\circ$  a na geomagnetických pólech je roven  $90^\circ$ . Jelikož úhly inclination a declination se s časem a geografickou polohou mění, jsou vydávány korekční tabulky, které jsou tisknuty na mapách pro danou polohu.



Obrázek 21: Složky magnetického pole [7]

V případě nakloněného kompasu dojde ke změně vyhodnocování jednotlivých složek magnetického pole. Pro správné určení azimutu je pak nutné provést korekci těchto složek. Pro správnou korekci je nutné znát úhly náklonu kompasu  $\varphi$  (úhel pitch) a  $\rho$  (úhel roll).

Ze znalosti těchto úhlů a složek horizontálního magnetického pole lze dopočítat vertikální složku magnetického pole  $H_{zc}$ . V případě 3-osého magnetometru ji lze měřit přímo.

$$H_{zc} = \frac{\sin \delta + H_{xc} \cdot \sin \varphi - H_{yc} \cdot \cos \varphi \cdot \sin \rho}{\cos \rho \cdot \cos \varphi} \quad (12)$$

Ze získaných všech složek magnetického pole  $H_{xc}$ ,  $H_{yc}$  a  $H_{zc}$ , lze provést korekci horizontálních složek magnetického pole Země.

$$H_x = H_{xc} \cdot \cos \varphi - H_{yc} \cdot \sin \varphi \cdot \sin \rho - H_{zc} \cdot \sin \varphi \cdot \cos \rho \quad (13)$$

$$H_y = H_{yc} \cdot \cos \rho + H_{zc} \cdot \sin \rho \quad (14)$$

Posledním krokem je samotný výpočet azimutu. Azimut je dán odklonem od vektoru horizontální složky magnetického pole. Jeho velikost je dána poměrem  $H_y$  a  $H_x$ . Jelikož funkce tangens je definována od  $-90^\circ$  do  $+90^\circ$  je výpočet azimutu závislý na znaménku jednotlivých složek (15).

$$\begin{aligned} H_x > 0 \quad H_y > 0 &\rightarrow \alpha = 360^\circ - \arctan \frac{H_y}{H_x} \\ H_x > 0 \quad H_y < 0 &\rightarrow \alpha = -\arctan \frac{H_y}{H_x} \\ H_x < 0 \quad H_y < 0 &\rightarrow \alpha = 180^\circ - \arctan \frac{H_y}{H_x} \\ H_x = 0 \quad H_y > 0 &\rightarrow \alpha = 270^\circ \\ H_x = 0 \quad H_y < 0 &\rightarrow \alpha = 90^\circ \\ H_x > 0 \quad H_y = 0 &\rightarrow \alpha = 0^\circ \\ H_x < 0 \quad H_y = 0 &\rightarrow \alpha = 180^\circ \end{aligned} \quad (15)$$

kde  $H_x$  je x-ová složka magnetického vektoru po korekci získaná pomocí rovnice (13) a  $H_y$  je y-ová složka magnetického vektoru vypočtená rovnicí (14).

## 7. ZÁVĚR

Cílem této práce bylo navrhnout a realizovat senzorické vybavení robotu pro projíždění soustavy zadaných GPS souřadnic v předem neznámém prostředí. V úvodní části práce je analýza známých snímačů pro mobilní robotiku. Následující část, popisuje vybrané snímače pro senzorické vybavení robotu. Při výběru senzorů jsem bohužel narazil na nemožnost sehnání některých komponent v malém množství v ČR, což vedlo k omezení výběru některých senzorů. Ve třetí části se zabývám návrhem a realizací řídicí jednotky senzorického subsystému, která je hlavní součástí pro zpracování údajů a předání je ostatním subsystémům robotu.

Navržené hardwarové řešení je poměrně univerzální a umožňuje relativně jednoduchou výměnu připojených senzorů. Rozmístění jednotlivých součástek na desce řídicí jednotky je uspořádáno do určitých logických bloků. Jelikož jde o první prototypovou desku, nevyhnul jsem se při návrhu některých chyb, které se ukázaly po osazení desky součástkami. Na desce řídicí jednotky by bylo vhodné použít robustnější konektor napájení, jelikož při častějším odpojováním desky dochází ke ztrátě pružnosti kontaktů a následně k výpadku napájení desky vlivem otřesů. Konektor SV2 s vyvedenými vstupy A/D převodníku by měl být umístěn dále od konektoru IC3, aby nedocházelo k jeho zakrytí připojeným akcelerometrem.

Jelikož navazující práce návrhu software nadřazeného řídicí subsystému nebyla zatím vytvořena, nebylo možné plně odzkoušet funkčnost a přesnost tohoto vybavení při nasazení na robotu. Použitelnost vytvořených algoritmů byla ověřena při zobrazování naměřených údajů výpisem do okna Hyperterminal v prostředí MS Windows. Vzhledem k pracnosti při ověřování činnosti a funkčnosti řídicí jednotky a použitých senzorů nebyla softwarově realizována korekce elektronického kompasu při náklonu robotu.

Do budoucna je proto vhodné vytvořit protokol pro komunikaci s nadřazeným řídicím systémem a vylepšit algoritmus zpracovávání naměřených dat o výpočet náklonu robotu přímo v mikrokontroléru. Případně nahradit interní A/D převodník mikrokontroléru za externí s menší úrovní šumu komunikující s mikrokontrolérem pomocí rozhraní I<sup>2</sup>C.

## **8. LITERATURA**

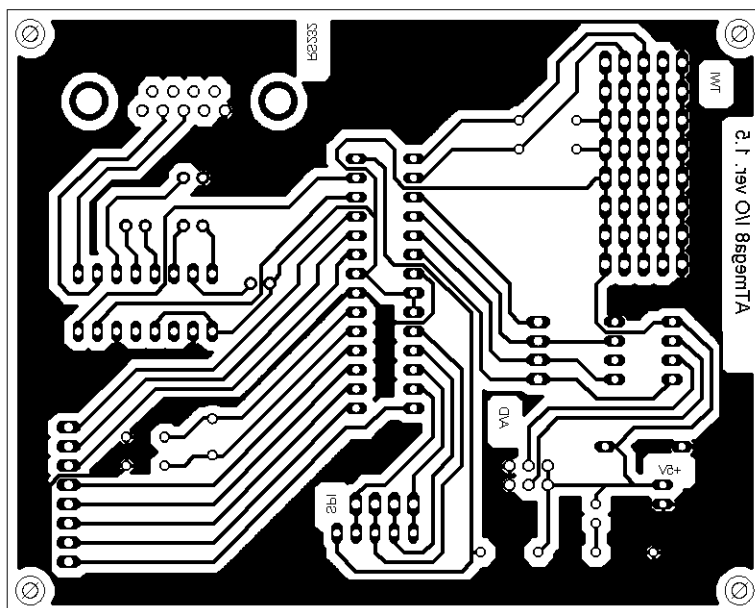
- [1] P. Novák: Mobilní roboty – pohony, senzory, řízení; 1. vydání; BEN technická literatura; Praha 2005; ISBN – 80-7300-1411
- [2] John Holland: Designing autonomous mobile robots, Elsevier; Burlington USA 2004; ISBN 0-7506-7683-3
- [3] J. Borenstein, H. R. Everett, L. Feng: Where I am? Sensors and Methods for Mobile Robot Positioning; University of Michigan 1996
- [4] A. Vojáček: 3D akcelerometr MMA7260, 14.5.2007  
<http://automatizace.hw.cz/clanek/2007051401>
- [5] <http://wiki.kn.vutbr.cz/robot/index.cgi?kompas>
- [6] A. Vojáček: Akcelerometry – integrované snímače od AD, 6.5.2005  
<http://automatizace.hw.cz/clanek/2005020601>
- [7] Electronic Compass Design using KMZ51 and KMZ52, Philips Semiconductors
- [8] A. Vojáček: Principy akcelerometrů 1. díl, 14.1.2007  
<http://automatizace.hw.cz/clanek/2007011401>
- [9] A. Vojáček: Principy akcelerometrů 2. díl, 26.1.2007  
<http://automatizace.hw.cz/clanek/2007012601>
- [10] <http://robotika.cz/articles/atmega8-board/cs>
- [11] Datasheet Atmel AVR ATmega8
- [12] Datasheet MAX232
- [13] Datasheet KMZ51
- [14] Datasheet MMA7260
- [15] Katalogový list ACC7260
- [16] Katalogový list SRF08
- [17] Katalogový list CMPS03

## SEZNAM PŘÍLOH

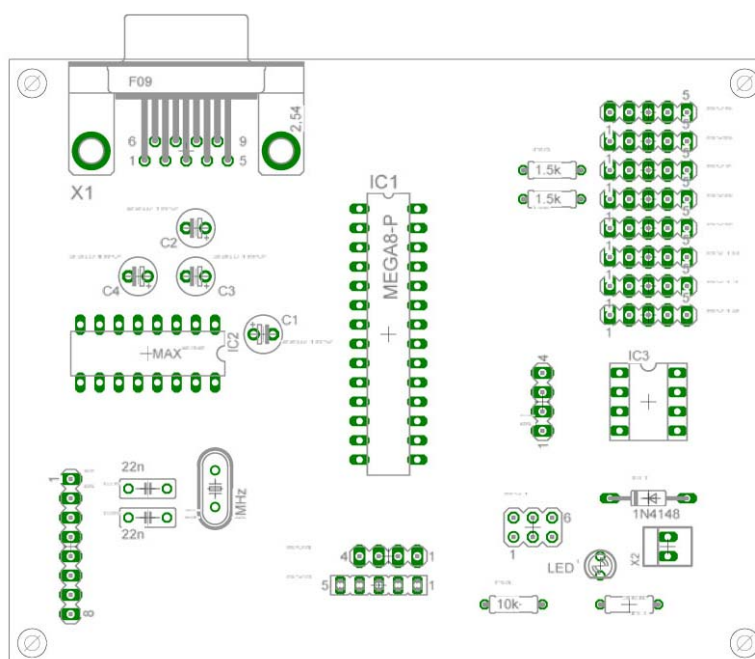
Příloha 1	Schéma obvodu centrální jednotky senzorického subsystému
Příloha 2	Deska plošného spoje centrální jednotky senzorického subsystému
Příloha 3	Seznam součástek centrální jednotky senzorického subsystému
Příloha 4	Schéma obvodu pro napájení z 12V.
Příloha 5	Schéma obvodu jednoduchého programátoru pro Ponyprog
Příloha 6	Disk CD s obsahem
	Elektronická podoba této práce
	Program pro mikrokontrolér ATmega8
	Datasheet



## Příloha 2



Deska plošného spoje centrální jednotky ze strany spojů



Deska plošného spoje centrální jednotky ze strany součástek

## Příloha 3

Seznam součástek:

R1	4k8
R2, R3	1k8
R4	10k
C1,C2,C3,C4	22μF/16V
C5,C6	22Nf
D1	1N4148
LED1	zelená ø3mm
IC1	ATmega8 + patice
IC2	MAX232 + patice
IC3	patice DIL8
Q1	8 MH
SV1	PLD-06S
SV2,SV4	PLS-04S
SV5	PS-05S
SV6..SV12	PLS-05S
SV13	PLS-08S
X1	D-SUB F09
X2	PWL 02S
2x	JUMPER



## Příloha 4

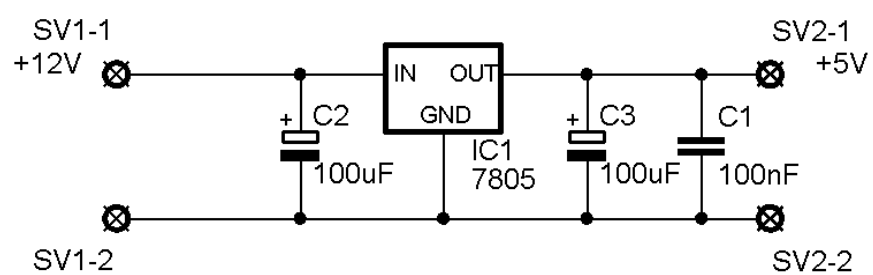
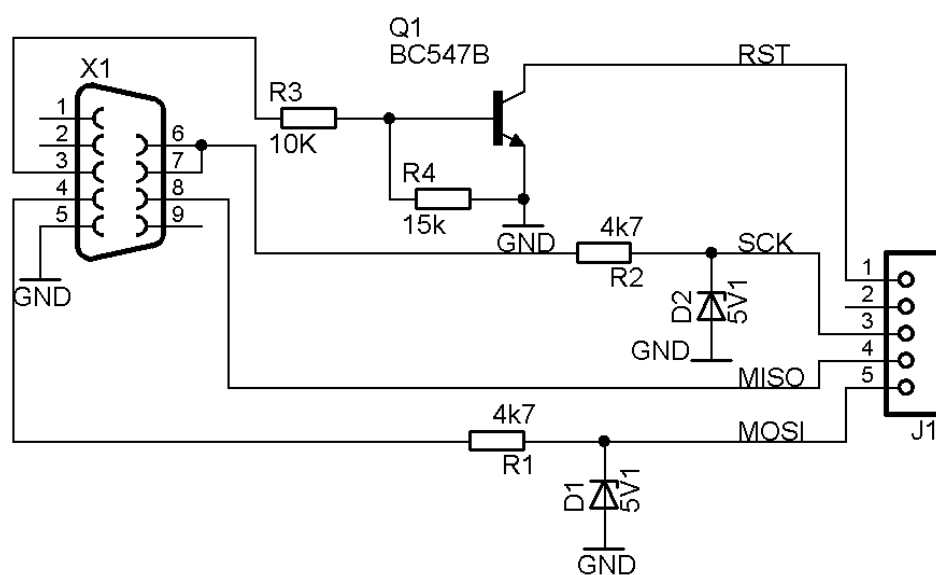


Schéma obvodu pro napájení z 12 V

## Příloha 5



## Schéma obvodu jednoduchého programátoru pro Ponyprog