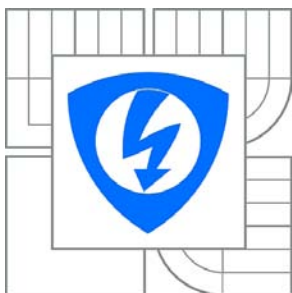




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

LOKÁLNÍ NAVIGACE ROBOTU PRO VNĚJŠÍ POUŽITÍ

LOCAL NAVIGATION FOR OUTDOOR ROBOT

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. MARTIN SKÁCEL

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. LUDĚK ŽALUD, Ph.D.

BRNO 2010



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav automatizace a měřicí techniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Kybernetika, automatizace a měření

Student: Bc. Martin Skácel

ID: 78427

Ročník: 2

Akademický rok: 2009/2010

NÁZEV TÉMATU:

Lokální navigace robotu pro vnější použití

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s metodami lokální navigace ve vnějším prostředí, včetně vyhýbání překážkám. Seznamte se s principy měření okolí robotu ve vnějším prostředí.

Navrhněte a realizujte systém pro lokální navigaci robotu. Realizovaný systém otestujte.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

J. A. Castellanos, J. D. Tardos, Mobile Robot Localization and Map Building, Kluwer Academic Publishers, 1999, ISBN 0-7923-7789-3

Termín zadání: 8.2.2010

Termín odevzdání: 24.5.2010

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

prof. Ing. Pavel Jura, CSc.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové 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 části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

A b s t r a k t

Tato diplomová práce se zabývá kompletním návrhem a realizací lokální navigace robotu pro projíždění soustavy zadaných GPS souřadnic. To obnáší studii aktuálně používaných principů senzorů, kterými může být tento robot vybaven. Senzorické vybavení je tvořeno snímači pro měření okolí robotu a snímači měřící orientaci robotu v prostoru. Dále je doplněno o vlastní řídicí jednotku s mikrokontrolérem ATmega8, obstarávající získávání dat ze senzoru a předávání těchto dat ostatním systémům robotu. Následuje návrh sběrnic a protokolů, kterými budou tyto senzory připojeny k řídicí jednotce. Jako nejvhodnější byla zvolena sběrnice I²C a RS232 a komunikační protokol byl převzat ze semestrálního projektu Bc. Michala Sitty. Účelem řídicí jednotky je vyčítání naměřených dat z připojených senzorů a realizace rozhraní mezi sensorovou sběrnicí a nadřazeným systémem. Systém pro lokální navigaci je navržen pro maximální rozšiřitelnost. Při návrhu byl kladen důraz na možnost budoucího použití nových senzorů.

Klíčová slova

robot, senzor, senzorický subsystém, lokální navigace, detekce překážek

A b s t r a c t

This diploma thesis deals with complete designing and implementation of local navigation of a robot which travels according to set GPS. This work contains a study of contemporary used principles of the sensors which can be used as the components of the robot. There are sensors for measuring the surroundings of the robot and orientation of the robot in the environs. The equipment includes an instructing control unit with the ATmega8 microcontroller. This equipment collects data from the sensors and transfers them to the other systems of the robot. The following part of the thesis deals with the draft of the buses and communication protocols, which are necessary for connection between the sensors and the control unit. The I²C and RS232 buses were chosen as the most suitable. The communication protocol was borrowed from the semester project written by Bc. Michal Sitta. The main task of this control unit is reading out the data which have been measured from connected sensors. The realization of interface between the sensor bus and the major system is another core goal of the control unit. The system for a local navigation is designed with the approach which allows the widest range of extensibility. During the designing of the control unit the future possibility of insertion other sensors was taken into consideration.

K e y w o r d s

robot, sensor, sensory subsystem, local navigation, obstacle detection

Bibliografická citace

Bc. SKÁCEL, M. *Lokální navigace robotu pro vnější použití*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 81 s.
Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Luděk Žalud, Ph.D.

P r o h l á š e n í

„Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma "Lokální navigace robotu pro venkovní použití" jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové 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 diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové 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: **21. května 2010**

Podpis:

P o d ě k o v á n í

Děkuji tímto vedoucímu diplomové práce panu doc. Ing. Luděkovi Žaludovi, Ph.D. za účinnou metodickou a odbornou pomoc při vypracování této diplomové práce a dále za cenné připomínky a rady.

OBSAH

1. ÚVOD	12
2. SENZORY PRO MOBILNÍ ROBOTY.....	14
2.1 Interní senzory.....	14
2.1.1 Senzory natočení.....	14
2.1.2 Otáčkoměry	16
2.1.3 Akcelerometr	16
2.2 Externí senzory	17
2.2.1 Taktilní senzory	17
2.2.2 Infračervené senzory.....	18
2.2.3 Indukční senzory.....	18
2.2.4 Kapacitní senzory	19
2.2.5 Ultrazvukové senzory (sonary).....	20
2.2.6 Laserové senzory	22
2.2.7 Kompas.....	24
3. SENZORICKÝ SYSTÉM ROBOTU	25
3.1 Senzorické vybavení robotu.....	25
3.1.1 Ultrazvukový dálkoměr SRF08	26
3.1.2 Laserový skener HOKUYO PB9-12	29
3.1.3 Elektronický kompas CMPS03	30
3.1.4 Akcelerometr ACC7260	31
3.2 Řídicí jednotka senzorického vybavení	33
3.2.1 Sběrnice I ² C.....	34
3.2.2 Sběrnice SPI	35
3.2.3 Rozhraní USART	36
4. NAMĚŘENÉ PARAMETRY SENZORŮ	38
4.1 Vyzařovací diagram SRF08	38
4.2 Výstupní charakteristika akcelerometru ACC7260	39
4.3 Výstupy elektronického kompasu CMPS03	40
5. REALIZACE	42
5.1 Umístění senzorů.....	42

5.2 Modul řídicí jednotky.....	44
5.2.1 Popis modulu	44
5.2.2 Popis zapojení.....	45
5.2.3 Postup osazení desky	46
5.3 Modul kompasu	46
5.3.1 Popis zapojení.....	46
5.3.2 Postup osazení desky	47
6. POPIS OBSLUŽNÉHO PROGRAMU	48
6.1 Komunikace s PC.....	48
6.1.1 Komunikační protokol.....	48
6.1.2 Dekódování zprávy ze sériové linky	50
6.1.3 Odpověď na přijatou zprávu	51
6.2 Komunikace se senzory	51
7. TESTOVACÍ PROGRAM	53
7.1 Program RobTest	53
7.2 Výpočet náklonu	54
7.3 Elektronické vyvážení kompasu	56
8. TESTOVÁNÍ SYSTÉMU	58
8.1 Test detekce překážek	58
8.2 Test měření náklonu robotu pomocí ACC7260	61
8.3 Test měření azimutu robotu	62
8.4 Test systému lokální navigace	64
9. ZÁVĚR.....	65
10. LITERATURA.....	67

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Vzor disku a průběh výstupních signálů [1].....	14
Obrázek 2: Absolutní enkodér, a) binární kód, b) Bratův kód.....	15
Obrázek 3: Struktura MEMS senzoru při působení zrychlení	17
Obrázek 4: Blokové schéma indukčního senzoru [7]	19
Obrázek 5: Blokové schéma kapacitního senzoru [8].....	20
Obrázek 6: Časový průběh budicího napětí jednosystémového měniče.....	21
Obrázek 7: Vyzařovací charakteristika ultrazvukového senzoru.....	21
Obrázek 8: Triangulační trojúhelník (1D) [13].....	22
Obrázek 9: Kolize s nízkou překážkou při zatáčení [3]	23
Obrázek 10: Ultrazvuk SRF08 popis pinů a jeho vyzařovací charakteristika	26
Obrázek 11: Snímané okolí skeneru PB9-12	29
Obrázek 12: Elektronický kompas CMPS03 a jeho vstupy	30
Obrázek 13: Akcelerometr ACC7260.....	31
Obrázek 14: Protokol I ² C [9]	34
Obrázek 15: Rámec zprávy USART [10]	37
Obrázek 16: Naměřený vyzařovací diagram SRF08.....	38
Obrázek 17: Nelinearita výstupu akcelerometru ACC7260.....	39
Obrázek 18: Výstupní hodnoty elektronického kompasu CMPS03 při vodorovné rotaci.....	40
Obrázek 19: Odchylka změřeného azimutu pomocí CMPS03 při náklonu elektronického kompasu.....	41
Obrázek 20: Umístění senzorů na robotu a znázornění jejich vyzařovacích diagramů	43
Obrázek 21: Uchycení ultrazvukových senzorů na předním panelu robotu	43
Obrázek 22: Blokové schéma senzorického subsystému.....	44
Obrázek 23: Modul řídicí jednotky senzorického vybavení	45
Obrázek 24: Protokol zprávy	49
Obrázek 25: Vývojový diagram načítání zprávy z PC.....	50
Obrázek 26: Rozhodovací strom pro dekodování typu zprávy.....	51
Obrázek 27: Testovací program RobTest	53

Obrázek 28: Složky gravitačního zrychlení působící na osu X a Z	54
Obrázek 29: Vymezení úhlů a složek gravitačního zrychlení.....	55
Obrázek 30: Složky magnetického pole Země [11]	56
Obrázek 31: Test detekce překážek před robotem	58
Obrázek 32: Detekované překážky pomocí ultrazvukových dálkoměrů SRF08	59
Obrázek 33: Detekované překážky pomocí laserového skeneru Hokuyo PB9-12	59
Obrázek 34: Odchylka změřeného náklonu pitch a roll pomocí akcelerometru ACC7260.....	61
Obrázek 35 Odchylka azimutu při náklonu kompasu CMPS03 bez vyvážení	62
Obrázek 36: Odchylka azimutu při náklonu kompasu CMPS03 s vyvážením	63
Obrázek 37: Robotour 2009 – přejezd na startoviště a odkrytá přední část robotu TIM2	64

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Registry ultrazvukového dálkoměru SRF08.....	27
Tabulka 2: Příkazy ultrazvukového dálkoměru SRF08	28
Tabulka 3: Barevné označení vodičů připojovacího kabelu skeneru PB9-12.....	29
Tabulka 4: Registry elektronického kompasu CMPS03 používané při I ² C komunikaci.....	31
Tabulka 5: Základní vlastnosti akcelerometru MMA7260	32
Tabulka 6: Nastavení měřicího rozsahu akcelerometru ACC7260.....	32
Tabulka 7: Přehled připojených senzorů a periférií	33

1. ÚVOD

Návrh a konstrukce autonomních robotů pro průzkum neznámého či nebezpečného prostředí patří mezi významné obory akademického i průmyslového výzkumu i vývoje. Klíčovou součástí každého mobilního robotu je lokální navigace, jejím úkolem je získávat informace o okolním prostředí a vyhýbat se překážkám. Při dálkovém řízení robotu člověkem využívá informace ze senzorů operátor a sám rozhoduje o způsobu vyhnutí se překážce, u plně autonomního robotu pak řídicí a plánovací algoritmus rozhoduje pomocí lokální navigace, jak se dané překážce vyhnout. Bez těchto informací by nebylo možné zabezpečit správnou funkci robota a v některých případech ani bezpečný provoz.

V rámci prací na UAMT byl vytvořen skupinou čtyř lidí kolový robot TIM2. Zvoleným vedoucím týmu byl Bc. Ivo Maceček, který se staral se o rozdělení úloh na projektu robotu a kontrolu jejich provedení. Jeho prací na projektu je GPS subsystém zpracovávající data z GPS a elektronického kompasu, a dále plánování trasy robotu. Druhým členem byl Bc. Michal Sitta, který navrhl a realizoval podvozek robotu a jeho pohonný subsystém včetně řídicí elektroniky tohoto subsystému. Třetím členem týmu je Tomáš Skočdopole, který je zodpovědný za programové vybavení robotu na vestavěném PC a komunikaci s ostatními subsystémy podle navrženého protokolu od Bc. Michala Sitty. Dále se stará o funkčnost a kompletnost programů, knihoven a operačního systému ArchLinux. Mojí prací na tomto projektu robotu bylo navrhnout a realizovat lokální navigace robotu včetně elektroniky pro zpracování dat z připojených snímačů.

Cílem této diplomové práce je seznámit se s problematikou lokální navigací pro mobilní roboty pro pohyb v terénu. Navrhnout vlastní senzorický systém pro vytvořený robot včetně elektroniky pro zpracování dat z vybraných snímačů tak, aby bylo možné projet předem zadanou trasu pomocí GPS souřadnic. Předpokládá se, že se robot bude pohybovat v neznámém prostředí a musí být schopen reagovat na změny prostředí a jeho okolí. Proto je zapotřebí vybavit robota senzory pro detekci překážek před robotem a elektronickým kompasem pro zjištění natočení robotu

k Zemskému severu. Navržená lokální navigace byla následně odzkoušena na soutěži autonomních robotů s názvem Robotour.

Tato práce obsahuje popis jednotlivých principů měření potřebných veličin pro zjištění informací o okolí robotu, dále výběr a popis jednotlivých senzorů použitých při realizaci senzorického vybavení robou. Dále se práce zabývá popisem elektroniky pro zpracování naměřených dat, tak aby tyto údaje mohly být předány řídicí jednotce robotu, a popisem komunikačního protokolu přes sběrnici USART s popisem všech zpráv. V práci je také uveden popis programu elektroniky zpracovávající naměřené údaje a způsob kompenzace náklonu elektronického kompasu.

V příloze jsou uvedeny kompletní schémata zapojení a jednotlivé desky plošných spojů, včetně soupisu použitých součástek.

2. SENZORY PRO MOBILNÍ ROBOTY

Senzory pro mobilní robotiku lze rozdělit 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 a další fyzikální vlastnosti objektů v prostředí a obecné vlastnosti samotného prostředí (teplotu, zvuk, atp.). Dále pak externí senzory mohou zjišťovat charakteristiky fyzikálních polí (elektromagnetické, magnetické, gravitační, ...).

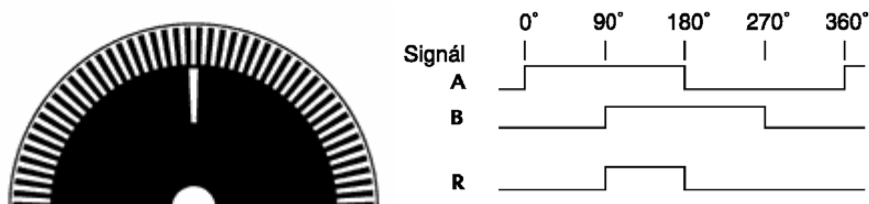
2.1 INTERNÍ SENZORY

Interní senzory poskytují robotu informace o jeho subsystémech. Lze je dále 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 základě 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. pulzní 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 tohoto pulzního disku a je zachyceno fotodetektorem umístěným z jeho druhé strany.



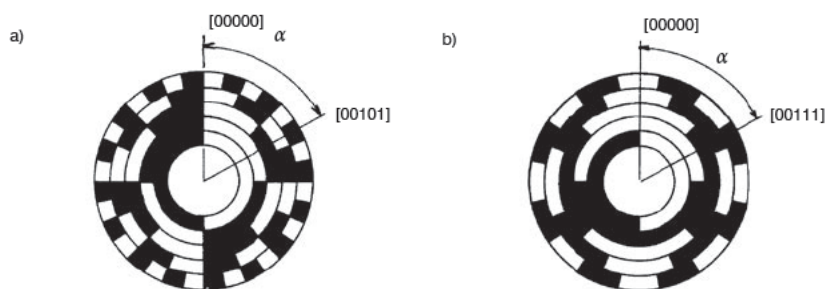
Obrázek 1: Vzor disku a průběh výstupních signálů [1]

Při otáčení hřídele pak disk střídavě světlo propouští a nepropouští (zacloňuje fotodetektor). Tyto světelné pulzy 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 pulzů na jednu otáčku, což je jeden z nejdůležitějších parametrů udávaných u každého inkrementálního snímače. Vyráběné snímače využívají signály dvou (případně tří) světelných kanálů, které jsou vzájemně posunuty o 90° , což umožňuje rozpoznat směr otáčení. Používaný třetí kanál generuje pulz 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.

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 informace 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.



Obrázek 2: Absolutní enkodér, a) binární kód, b) Bratův kód

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 tachodynamy.

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 jsou 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.

První integrací zrychlení lze získat rychlost objektu, na kterém je akcelerometr umístěn:

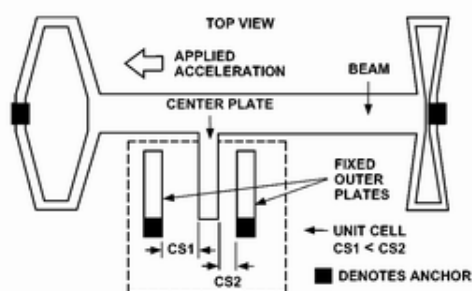
$$v(t) = \int_0^t a(t) dt, \quad (1)$$

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 dvojitá integrace.

Většina akcelerometrů využívá pro měření zrychlení malé těleso (seismickou hmotu) nebo nosník, který se působením zrychlení vychyluje ze své rovnovážné polohy. Toto vychýlení je úměrné zrychlení a je následně vyhodnocováno kapacitní, piezoelektrickou nebo piezorezistivní metodou měření polohy.



Obrázek 3: Struktura MEMS 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 následně porovnání měření obou senzorů.

2.2 EXTERNÍ SENZORY

Externí senzory poskytují informace o okolí robota. Pro navigační účely to jsou informace o pozici a orientaci robota v globálním souřadném systému (globální navigace), a také o rozmístění a vzdálenosti překážek v jeho okolí (lokální navigace).

Tyto senzory se dále dělí podle způsobu měření na dotykové a bezdotykové. Dotykové senzory, jak již název napovídá, se musí překážky dotknout, jejich dosah je tedy značně omezen. Bezdotykové senzory používají k měření různé principy.

2.2.1 Taktilní senzory

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.

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

2.2.2 Infračervené senzory

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.

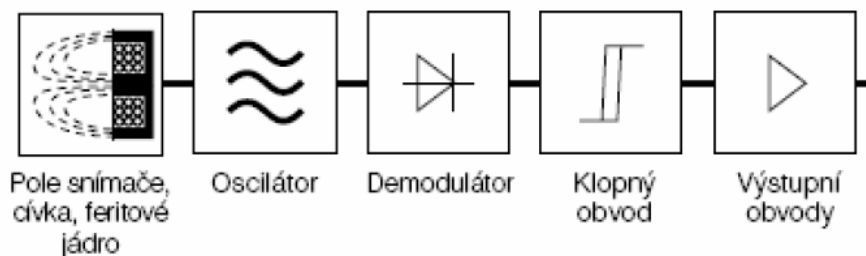
Tento senzor poskytuje dvouhodnotový signál – detekuje odražený IR signál/ nedetekuje odražený signál. Nevýhodou IR senzorů pracujících na detekci odraženého světla je, že množství odraženého světla je závislé na barvě překážky a druhu povrchu.

2.2.3 Indukční senzory

Indukční senzor je tvořen elektromagnetickou cívkou, která se využívá k detekci přítomnosti vodivého kovového materiálu. Senzor nedokáže detekovat nekovový materiál. Indukční proximní senzory využívají oscilátoru tlumeného vířivými proudy. Tento typ snímače obsahuje cívku, oscilátor, spínací obvod a výstupní obvod.

Elektromagnetické pole produkované oscilátorem je vyzařováno skrz cívku ven z čela snímače. Obvod má nastavenou zpětnou vazbu z pole tak, aby se oscilace udržovaly. Když do elektromagnetického pole snímače vstoupí objekt z kovového

materiálu, začnou v tomto objektu proudit vířivé proudy. To způsobí zatížení snímače, pokles amplitudy oscilátoru a elektromagnetického pole. Jak se objekt přibližuje ke snímači, vířivé proudy narůstají a s nimi i zatížení snímače a následně pokles amplitudy oscilátoru. Spínací obvod sleduje amplitudu oscilátoru.



Obrázek 4: Blokové schéma indukčního senzoru [7]

Při dvouhodnotovém výstupu je spínací obvod nastaven na určitou hodnotu amplitudy a při přechodu přes tuto hranici se přepne. Z amplitudy kmitů můžeme usuzovat vzdálenost objektu od čela snímače. Hlavní nevýhodou indukčních snímačů je necitlivost na nekovové materiály a malý rozsah měření. Ani u kovových materiálů není vše jednoznačné, protože každý kov má různý vliv na elektromagnetické pole indukčního snímače [2].

2.2.4 Kapacitní senzory

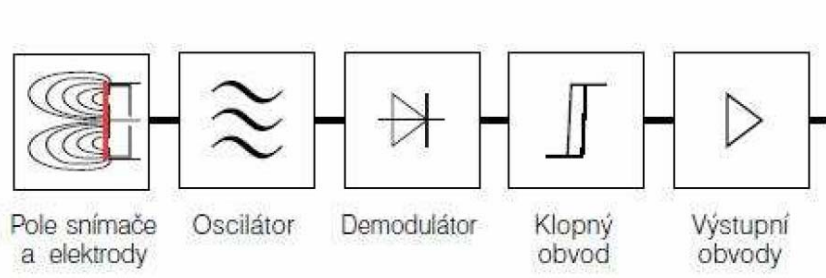
Tyto senzory na rozdíl od indukčních detekují i nekovové objekty. Pro měření využívají změnu kapacity kondenzátoru. Toho lze dosáhnout změnou geometrických vlastností (plocha elektrod S , vzdálenosti elektrod l) nebo změnou permitivity ε (změna vlastností dielektrika). Obecný vztah pro výpočet kapacity deskového kondenzátoru s homogenním dielektrikem je:

$$C = \varepsilon \frac{S}{d} \quad (3)$$

Při předpokladu zachování konstantní velikosti senzoru, cíle a materiálu dielektrika (vzduch), je jedinou proměnnou při výpočtu kapacity deskového kondenzátoru velikost mezery. Při zachování tohoto předpokladu bude budící elektronika navržena tak, aby předpokládala, že veškeré změny kapacity jsou

výsledkem změny velikosti mezery. Elektronika je pak kalibrována, tak aby změny napětí na výstupu byly proporcionálně úměrné změnám kapacity.

Při výběru senzoru pro určitou aplikaci je primárně uvažována velikost měřeného objektu. Rozsah, ve kterém senzor měří, je závislý na ploše senzoru. Větší plocha znamená větší rozsah.



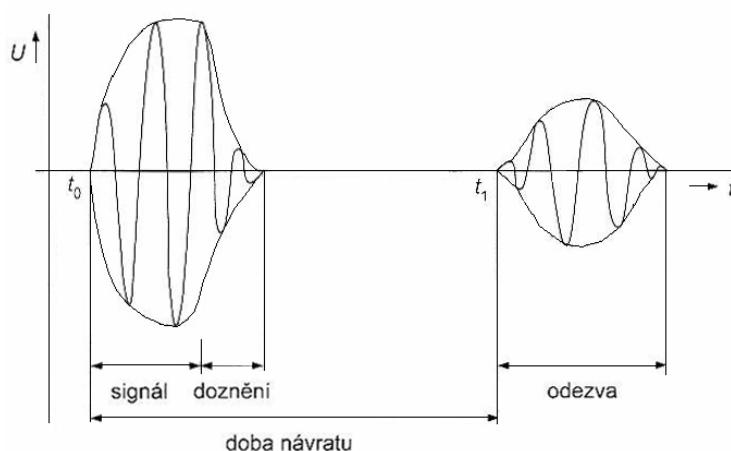
Obrázek 5: Blokové schéma kapacitního senzoru [8]

Pokud se přiblíží objekt (voda, dřevo, kov, aj.), změní se kapacita a tím se uvede oscilační RC obvod do chodu, dokud se hodnota znovu nezmění. Pro zvýšení citlivosti (zpravidla dvojnásobně) se používá diferenciální zapojení. Dosah kapacitních snímačů je srovnatelný s indukčními – maximálně několik desítek milimetrů.

2.2.5 Ultrazvukové senzory (sonary)

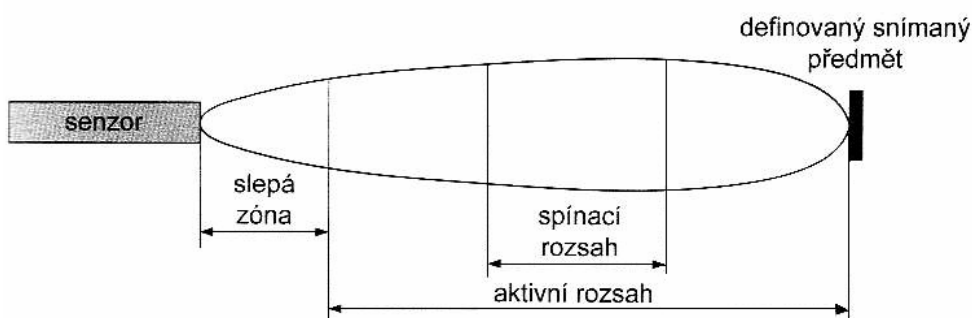
Ultrazvukové senzory (sonary) pracují na kmitočtu vyšším než je schopno lidské ucho zaznamenat. Sonary pracují na principu vysílání krátkých shluků impulzů v oblasti ultrazvukového kmitočtového spektra a příjmu tohoto signálu odraženého lokalizovaným objektem.

Vzdálenost objektu je možno vypočítat pomocí známé rychlosti šíření akustických signálů ve zmámeném 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 budicího napětí jednosystémového měniče

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



Obrázek 7: Vyzařovací charakteristika ultrazvukového senzoru

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 i úhel natočení senzoru, z čehož lze vyhodnotit polohu překážky. Je-li opakovací frekvence měření cca 30ms, pak celková minimální doba je 1s pro 36 měření s úhlovým rozlišením 10°.

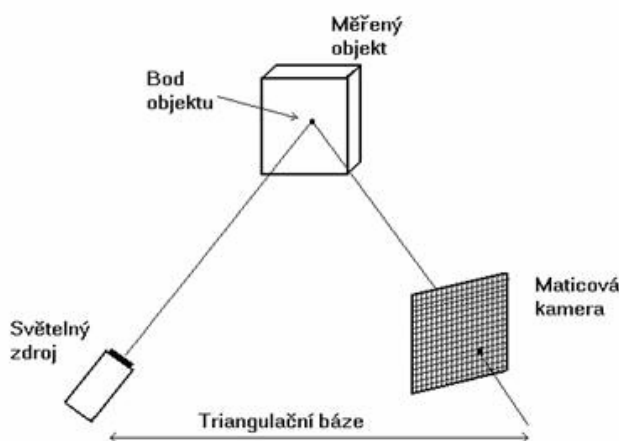
2.2.6 Laserové senzory

Měření vzdálenosti k překážkám pomocí laserového paprsku patří k základní výbavě autonomních robotů již od jejich vzniku. Laserové senzory pracují na principu vysílání laserového paprsku a jeho odrazu od detekovaného předmětu. Z důvodu pokrytí většího prostoru před robotem se častěji používají rovinné systémy využívající rotačního zrcadla k rozmítání paprsku laseru v oblouku 180° a více. Největší výhodou rozmítaného laserového systému je, že může objevit mnoho pasivních objektů v širokém rozmezí úhlů s využitím jednoho senzoru umístěného na robotu. Obnovovací rychlost rozmítání je obvykle 1 až 100 Hz.

Podle způsobu vyhodnocení vzdálenosti lze laserové skenery rozdělit na:

- Triangulační
- Měřicí dobu letu paprsku (TOF)

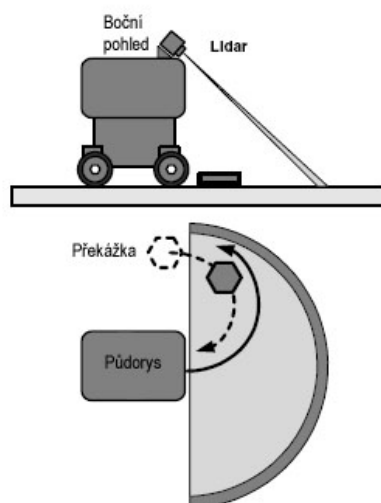
Triangulační laserový senzor pracuje tak, že promítá světelný bod na měřený objekt a vstupní čočka promítá odražený paprsek na detektor. Zdroj světla spolu se detektorem a osvětleným bodem na zkoumaném objektu tvoří tzv. triangulační trojúhelník. Jak se objekt přibližuje nebo oddaluje od střední vzdálenosti měření, pohybuje se odražený paprsek na detektoru. Ze známé ohniskové vzdálenosti čočky maticové kamery, rozlišení detektoru a pozice paprsku na detektoru, můžeme vypočítat vzdálenost objektu od snímače.



Obrázek 8: Triangulační trojúhelník (1D) [13]

Triangulační senzor se obvykle skládá ze tří částí: zdroje světla, snímací části a elektronického procesoru. Zdroj světla, který je často tvořen obyčejnou laserovou diodou nebo infračervenou diodou, se promítá na měřený objekt přes zaostřující optiku. Nejmenší velikost bodu je nastavena ve středu měřicí vzdálenosti. Směrem od tohoto středu se laser rozostřuje a bod se zvětšuje. Snímací část pak shromažďuje přijaté světlo a zobrazuje jej na detektor tvořený maticovým polem. Z pozice dopadu paprsku na detektor pak lze určit vzdálenost objektu.

Laserové senzory založené na **měření době letu** (TOF) paprsku vysílají světelný pulz a světlo odražené od měřeného objektu je přijato přijímací jednotkou. Měřená vzdálenost od objektu je určena časem, který pulz potřeboval k cestě od vysílače k objektu a zpět k přijímači. Metoda TOF je tedy založena na stejném principu jako ultrazvukové snímače, tj. na měření doby šíření světelného signálu v již známém prostředí. Nevýhodou této metody je skutečnost, že rychlost světla je příliš vysoká, z čehož vyplývají velké nároky na přesnost měřicího zařízení. Z tohoto důvodu se používá jiná veličina, která je spjatá s časem a lze ji přesně měřit. Je to změna fáze odraženého signálu. Pokud je vysílané světlo ze zdroje záření modulované konkrétním signálem, pak vykazuje na straně přijímače posuv fáze, který je úměrný době letu paprsku. Na straně přijímače stačí přijatý světelný signál porovnat s referenčním a z rozdílu určit hledaný čas. Pro tuto metodu lze použít libovolnou vlnovou délku světla a je méně ovlivnitelná rušením.



Obrázek 9: Kolize s nízkou překážkou při zatáčení [3]

Laserový senzor pracuje rychleji než ultrazvukový senzor. Odezva u těchto systémů je závislá na počtu měření a způsobu vyhodnocení signálu. Navíc měření laserovým senzorem je oproti měření pomocí ultrazvuku méně ovlivněno parametry prostředí, jako je proudění vzduchu, vlhkost, či 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.

2.2.7 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, které 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).

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 magnetická 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.

3. SENZORICKÝ SYSTÉM ROBOTU

Senzorický systém robotu je nejzákladnější část robotu poskytující řídicí jednotce robotu a lokální navigaci vjem okolního prostředí tak, aby byla řídicí jednotka schopna reagovat na jeho změny. Pro jeho návrh je vhodné si tuto úlohu rozdělit na dvě základní části. První část bude zaměřena na výběr použitelných senzorů a druhá část na návrh řídicí jednotky senzorického systému.

3.1 SENZORICKÉ VYBAVENÍ ROBOTU

Senzorické vybavení robotu má být použito na kolovém robotu TIM2 s Ackermanovým řízením podvozku. Jelikož robot neumí překonávat překážky, jako jsou schody, lze předpokládat, že se robot bude pohybovat po rovině nebo po nakloněné rovině. Z toho vyplývá, že pro lokalizaci stačí znát jeho pozici ve dvou osách (x , y) a jeho natočení podle těchto os.

Pro navigaci je potřeba mít informace o okolí robotu. Podle naší koncepce nesmí nikdy nastat situace, že by robot do překážky mohl narazit. Z tohoto důvodu jsou použity pouze bezdotykové senzory. Nejdůležitějším parametrem senzorů je jejich měřicí rozsah. Porovnáním rozsahu bezdotykových senzorů lze použít pro identifikaci překážky pouze ultrazvukových nebo optických senzorů. Kapacitní a indukční senzory mají pro mobilního robota příliš malý měřicí rozsah a navíc indukční snímače reagují jen na kovové předměty.

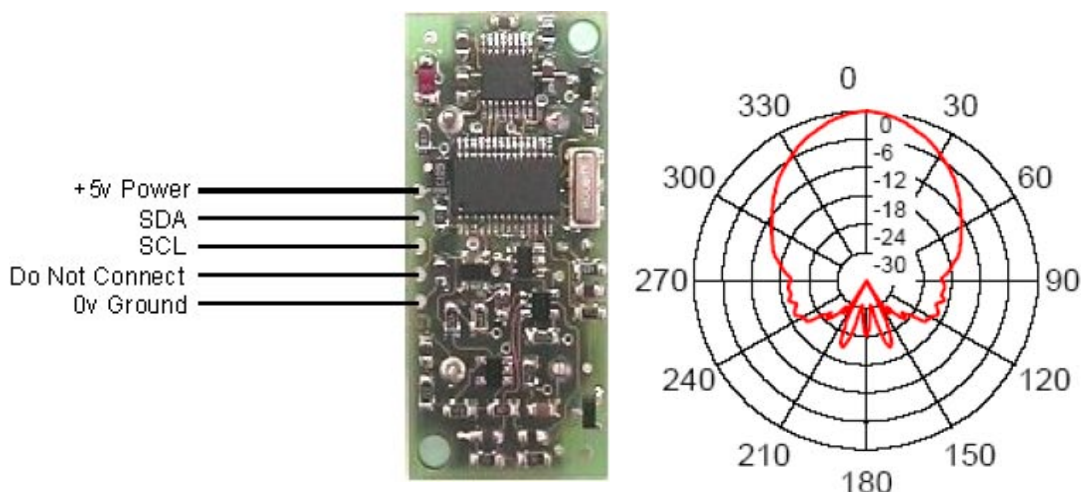
Výsledné senzorické vybavení robotu je tvořeno těmito typy senzorů:

- třemi ultrazvukovými dálkoměry SRF08 podávajícími informace o vzdálenosti překážky od robotu,
- elektronickým kompasem CMPS03 udávajícím azimut robotu a tedy orientaci souřadného systému robotu vůči souřadnému systému prostředí,
- akcelerometr ACC7260 poskytující informaci o náklonu robotu,
- laserovým dálkoměrem PB9-12 od firmy HOKUYO, který je zde doplněn pro zvýšení přesnosti identifikace překážky před robotem a zvýšení možnosti se této překážce lépe vyhnout.

Jednotlivé interní senzory měřicí natočení a otáčení náprav jsou popsány v diplomové práci Bc. Michala Sitty. Interní senzory nejsou připojeny k řídicí jednotce senzorického vybavení, ale k jednotlivým modulům, pro které získávají informace o stavu robotu.

3.1.1 Ultrazvukový dálkoměr SRF08

Ultrazvukový dálkoměr SRF08 umožňuje měřit vzdálenost v rozmezí 3cm až 6m s vyzařovacím úhlem 55°. Komunikace s řídicí jednotkou je realizována pomocí rozhraní I²C. Obvody pro komunikaci pomocí rozhraní I²C 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 I²C sběrnici reagují také na adresu 0 (univerzální adresa), takže zasláním příkazu na adresu 0 zahájí měření všechny připojené moduly současně. Výsledky měření musí být přečteny z unikátních individuálních adres připojených modulů.



Obrázek 10: Ultrazvuk SRF08 popis pinů a jeho vyzařovací charakteristika

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 softwaru. Doba měření je nastavena na 65ms, ale může být změněna zápisem do registru 2. SRF08 neodpovídá na příkazy na I²C během měření. Registr 1 poskytuje při čtení údaje ze senzoru osvětlení. Tato hodnota je občerstvena při každém měření vzdálenosti,

po skončení měření může být přečtena. První odraz je uložen v registrech 2 a 3, druhý v 4 a 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 režimu. Do tohoto režimu je modul automaticky přepnut po skončení měření a vyčkává na další příkaz.

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.

Tabulka 1: Registry ultrazvukového dálkoměru SRF08

Adresa registru	Čtení	Zápis
0	Verze softwaru	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

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.

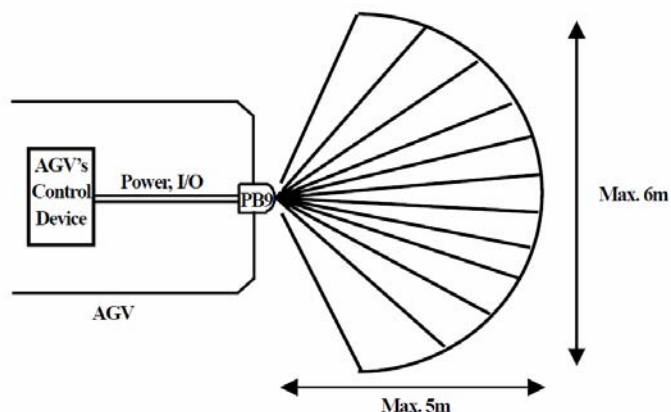
**Tabulka 2: Příkazy ultrazvukového dálkoměru SRF08**

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

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.

### 3.1.2 Laserový skener HOKUYO PB9-12

Laserový skener PB9-12 od firmy HOKUYO AUTOMATIC CO., LTD je malý průmyslový 2D snímač pro skenování okolí v rozmezí 0,1 – 5m. Skener snímá jen ve vodorovném směru s úhlovou výsečí 162°, která je rozdělena na 91 kroků. Snímanou vzdálenost vrací přibližně s centimetrovou přesností. Jako zdroj záření používá LED na vlnové délce  $\lambda = 870nm$ . Skenovaný prostor je znázorněn na obr. 11. Maximální měřená vzdálenost závisí na vlastnostech detekovaných objektů. Uvedené vzdálenosti jsou uvedeny pro detekovaný bílý papír o rozměrech 400x400 mm. Samotný snímač je napájen 24V DC s maximálním odběrem proudu 250 mA. Komunikace se snímačem je možná pomocí RS-232 nebo pomocí logických úrovní. Zapojení konektoru pro RS-232 je uvedeno v tabulce 3. Po připojení napájecího napětí začne snímač automaticky vysílat informace o detekované překážce.



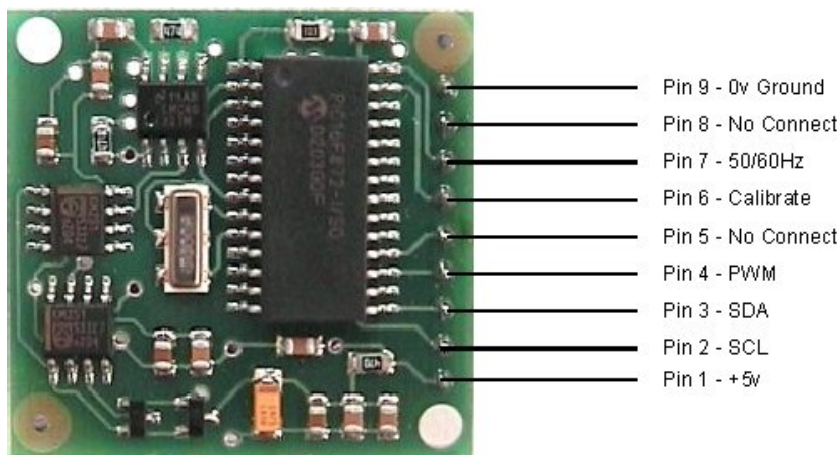
Obrázek 11: Snímané okolí skeneru PB9-12

Tabulka 3: Barevné označení vodičů připojovacího kabelu skeneru PB9-12

Barva vodiče	Popis	Č. pinu na D-sub s 9 piny
žlutá/červená	serial vstup (RXD)	3 (TXD)
žlutá/zelená	serial výstup (TXD)	2 (RXD)
žlutá/černá	serial GND	5 (GND)

### 3.1.3 Elektronický kompas CMPS03

Elektronický kompas je realizován pomocí modulu CMPS03 využívajícího senzory KMZ51 od firmy Philips, které jsou navzájem pootočený o 90°. Dále obsahuje podpůrnou elektroniku pro zpracování signálů ze senzorů KMZ51. Měřicí rozsah senzoru KMZ51 je  $\pm 200$  A/m a citlivost 16 (mV/V)/(kA/m), což je dostačující citlivost k měření magnetického pole země. Ze signálů dvou navzájem kolmých senzorů lze vypočítat směr horizontální složky geomagnetického pole země. Napájení tohoto modulu je 5V/20mA. Informaci o azimutu lze získat dvěma způsoby: a) z šířkově modulovaného signálu na vývodu 4 nebo b) přes I²C interface na vývodech 2 a 3 z registru 1 jako byte nebo z registru 2, 3 jako word.



**Obrázek 12: Elektronický kompas CMPS03 a jeho vstupy**

Před nasazením je třeba modul správně kalibrovat v daných podmínkách. Tuto kalibraci je možné provést pomocí I²C. Spočívá v zápisu FFH do vnitřního registru 15 při natočeném kompasu postupně na sever, východ, jih a západ.

Přivedením příslušné logické úrovně na vývod 7 lze potlačit rušení ze síťových rozvodů. Připojením na nízkou úroveň probíhá měření s periodou 40ms (pro 50Hz), po připojení na vysokou úroveň se měří každých 33,3ms (pro 60Hz). Tento vstup je ošetřen odporem k +5V, pro 60Hz může zůstat nepřipojen.

**Tabulka 4: Registry elektronického kompasu CMPS03  
používané při I²C komunikaci**

Registr	Význam
0	Verze softwaru
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

#### 3.1.4 Akcelerometr ACC7260

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 13: Akcelerometr ACC7260**

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 výrobcem nastavenou nulovou hladinu a zlomový kmitočet filtru.

**Tabulka 5: 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 6: Nastavení měřicího rozsahu akcelerometru ACC7260**

G1	G2	Rozsah	Citlivost [mV/g]
0	0	±1,5g	800
1	0	±2,0g	600
0	1	±4,0g	300
1	1	±6,0g	200

### 3.2 ŘÍDICÍ JEDNOTKA SENZORICKÉHO VYBAVENÍ

Řídicí jednotka má za úkol komunikovat se sonary, kompasem a akcelerometrem, získávat z nich naměřená data a odesílat je k dalšímu zpracování do řídicího počítače. Následující tabulka obsahuje přehled připojených senzorů a periférií k řídicí jednotce.

**Tabulka 7: Přehled připojených senzorů a periférií**

Název	Komunikační rozhraní
Ultrazvukový dálkoměr	I ² C
Elektronický kompas	I ² C
Akcelerometr	vstup A/D převodníku s výstupem I ² C
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 při napájení z akumulátorů.

Pro řízení sběrnice I²C jsem zvolil nízkopříkonový 8bitový mikrokontrolér AVR ATmega8 od firmy Atmel v 28 pinovém pouzdře DIL.

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

- o instrukční soubor se 130 instrukcemi,
- o 32 8bitových registrů,
- o paměť programu FLASH 8kB,
- o datová paměť RAM 1kB,
- o datová paměť EEPROM 512B,
- o dva 8bitové čítače/časovače a jeden 16bitový,
- o tři PWM kanály,
- o 10 bitový A/D převodník,
- o jednotky USART, SPI, TWI (podpora I2C), WDT,
- o zabudovaný RC oscilátor.

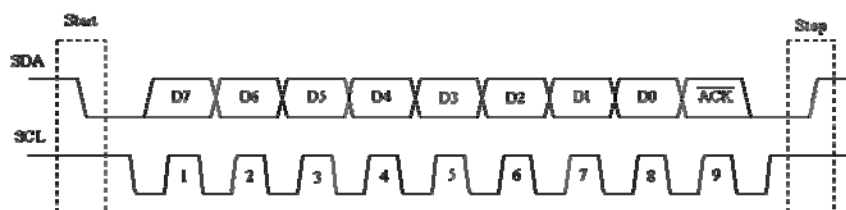
### 3.2.1 Sběrnice I²C

Sběrnice I²C je reprezentována pomocí dvou vodičového propojení mezi několika součástkami (MASTER a SLAVE), které jsou připojeny na téže sběrnici a mají různé adresy. Sběrnice používá sériovou linku SDA (Serial Data), ve které se přenášejí data i adresy jednotlivých periférií. Dále linku hodinového signálu SCL (Serial CLock) určenou pro synchronizaci, kterou může vysílat pouze MASTER. U sběrnice je potřeba osadit linky tzv. zdvihacími odpory (pull up resistors).

Protokol I²C je definován tak, aby jednotliví účastníci poznali, že jde o začátek přenosu nebo konec přenosu, popř. je-li sběrnice neaktivní.

- o START bit – signál SDA se změní z úrovně H na úroveň L, zatímco signál SCL zůstává na hodnotě H.
- o STOP bit – signál SDA se změní z úrovně L na úroveň H a SCL zůstává na H.
- o Neaktivní stav – SDA i SCL jsou na vysoké úrovni.
- o Potvrzení (acknowledge) – přijímač potvrzuje příjem bitu posláním low hodnoty na SDA, poté co vysílač pošle devátý hodinový impuls. Potvrzení znamená, že vysílač bude posílat další byte.

Přenos dat probíhá tak, že MASTER pošle nejdříve START bit, poté pošle v osmi bitech adresu zařízení (přenos začíná bitem s nejvyšší prioritou). V posledním, osmém bitu R /W, se určuje směr toku dat, tzn. 0 pro zápis. Tato data jsou pomocí hodinových impulsů posouvána dále. Jakmile SLAVE potvrdí ACK (acknowledge), MASTER pošle byte s daty, a jakmile bude i tento přenos potvrzen, MASTER může poslat ukončovací Stop bit nebo posílat další data. Mají-li se číst data od SLAVE, musí MASTER poslat poslední osmý bit R/W jako úroveň H. MASTER může ukončit přenos vynecháním ACK a posláním Stop bitu.



Obrázek 14: Protokol I²C [9]

### 3.2.2 Sběrnice SPI

Sběrnice SPI (*Serial Peripheral Interface*) představuje jednu z forem sériových externích sběrnic sloužících pro vzájemné propojení dvou či více komunikujících uzlů, přičemž jeden uzel obvykle vystupuje v roli takzvaného řadiče sběrnice (MASTER), ostatní uzly pracují v režimu SLAVE. Uzel, který pracuje jako MASTER, obsahuje generátor hodinového signálu, který je rozveden do všech ostatních uzlů, čímž je umožněn zcela synchronní (navíc obousměrný) přenos dat. Hodinový signál je rozváděn vodičem označovaným symbolem SCK. Kromě vodiče s hodinovým signálem jsou uzly propojeny dvojicí vodičů označovaných většinou symboly MISO (Master In, Slave Out) a MOSI (Master Out, Slave In), pomocí nichž se obousměrně (full duplex) přenáší data. Posledním signálem, který se u této sběrnice používá, je signál SS (Slave Select), jenž slouží – jak již jeho název napovídá – k výběru některého uzlu pracujícího v režimu SLAVE. Všechny čtyři signály, tedy: SCK, MISO, MOSI i SS, pro svou funkci vyžadují pouze jednosměrné porty, což přispívá k jednoduché a především levné implementaci této sběrnice.

Přenos dat probíhá v následujícím pořadí:

- o Pro komunikaci Master nastaví log. 0 na SS zařízení se kterým chce komunikovat.
- o Pak začne generovat hodinový signál na SCLK a v té chvíli vyšlou obě zařízení svoje data, přičemž MOSI je vždy Master výstup, Slave vstup a MISO je Master Vstup, Slave výstup.
- o Jakmile jsou data vyslána, může komunikace dále pokračovat.
- o Master dále dodává hodinový signál, hodnota SS se nemění nebo může být ukončena: Master přestane vysílat hodinový signál a nastaví SS do log. 1.
- o Délka vyslaných dat je buď 8bit a nebo 16bit.

### 3.2.3 Rozhraní USART

USART (Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter) je sériové rozhraní sloužící pro komunikaci mikrokontroléru se svým okolím. Rozhraní USART je také známo jako SCI (Serial Communications Interface). Modul USART, který obstarává komunikaci, může být nastaven v jednom z následujících režimů:

- asynchronní (plný duplex),
- synchronní - master (poloviční duplex),
- synchronní - slave (poloviční duplex).

V asynchronním režimu není vysílán hodinový signál. Jsou používány dva piny označené zpravidla jako TX a RX pro vysílání a příjem dat. Při komunikaci dvou mikrokontrolérů je třeba, aby měly nastavenou stejnou přenosovou rychlost. Mikrokontrolér, který přijímá data, se na začátku pokusí synchronizovat svou vnitřně generovanou přenosovou rychlost s přicházejícími asynchronními rámci dat. Synchronizační proces je opakován při každé detekci start bitu.

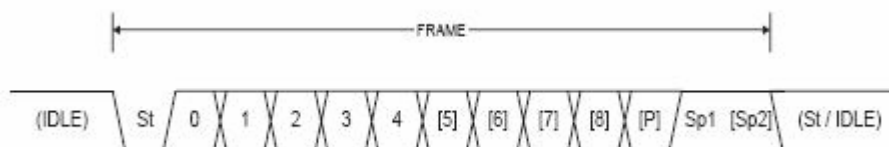
V synchronním režimu je zapotřebí přenášet hodinový signál. Pokud mikrokontrolér generuje hodinový signál vnitřně a posílá ho na svůj výstupní pin, pracuje v režimu master. Pokud sám hodinový signál přijímá, nachází se v režimu slave.

Jednotka USART používá logické úrovně, to znamená, že při použití napájecího napětí 5V, má signál H hodnotu blízkou 5V, kdežto signál L má hodnotu „potenciálu země“. Někdy se může stát, že tyto napětíové úrovně nevyhovují. V případě standardu RS-232 se používá napětí menší než -5V pro reprezentaci logické jedničky a napětí větší než 5V pro logickou nulu. V tomto případě je třeba použít převodník úrovní jako například MAX232.

Jednotka USART mikrokontroléru ATmega8(L) umožňuje tyto formáty rámců zpráv:

- 1 start bit,
- 5,6,7,8 nebo 9 datových typů,
- žádná, lichá nebo sudá parita,
- 1 nebo 2 stop bity.

Na obrázku 15 je zobrazeno, jak může takový rámec vypadat. Rámec začíná start bitem, pak následuje až devět datových bitů posílaných od nejméně důležitého; dále může být vložen paritní bit, za kterým následují již jen stop bity.



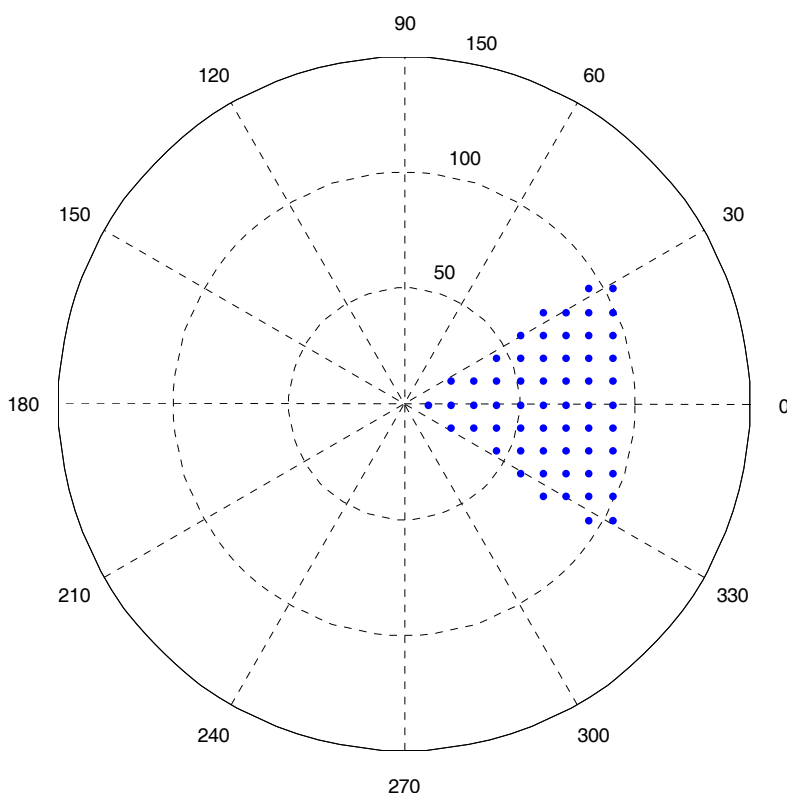
**Obrázek 15: Rámec zprávy USART [10]**

## 4. NAMĚŘENÉ PARAMETRY SENZORŮ

### 4.1 VYZAŘOVACÍ DIAGRAM SRF08

Pro rozmístění ultrazvukových senzorů SRF08 je potřeba znát jejich vyzařovací diagram. Ten je sice uveden výrobcem, ale je jen orientační. Vyzařovací diagram je kuželový a jeho parametry jsou dány charakteristikou ultrazvukových měničů, takže jej nelze měnit.

Při měření diagramu byly registry zesílení a měřené vzdálenosti v továrním nastavení. Při měření vyzařovacího úhlu byla měřena překážka o rozměru 400x400 mm ve vzdálenosti 0,1 - 0,9 m.



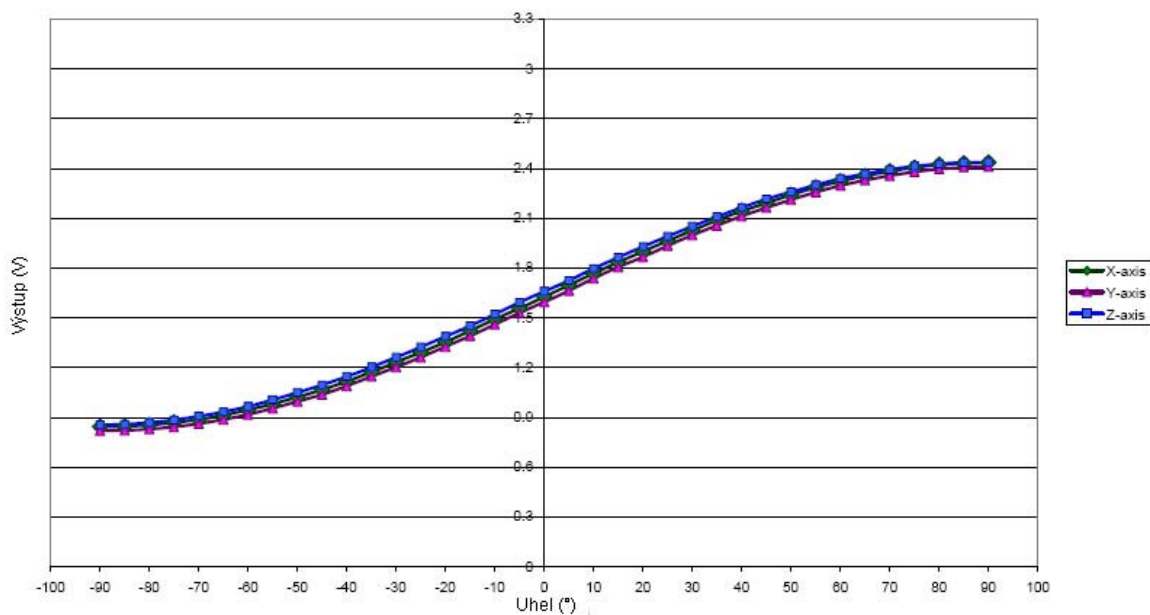
**Obrázek 16: Naměřený vyzařovací diagram SRF08**

Během měření byl zjištěn odběr proudu při měření 12mA, špičkově 275mA, a 3mA ve stanby režimu. Modul se po skončení měření automaticky přepíná do stanby režimu a vyčkává na další příkaz (nové měření nebo vyčtení hodnoty).

## 4.2 VÝSTUPNÍ CHARAKTERISTIKA AKCELEROMETRU ACC7260

Pro měření náklonu robotu je potřeba znát statickou charakteristiku akcelerometru na nakloněné rovině ve všech osách. V případě, že charakteristika bude nelineární, je potřeba ji linearizovat nebo se omezit na měření náklonu jen v lineární části.

Měření výstupní charakteristiky bylo provedeno na nakloněné rovině pro každou osu v rozsahu  $\pm 90^\circ$ . Jelikož charakteristika není v celé své šířce lineární, tak nejmenší chybovost při měření náklonu je v lineární části charakteristiky, což odpovídá  $-45^\circ$  do  $+45^\circ$ . Rozdíly mezi jednotlivými osami jsou způsobeny rozdílnými výstupními napětími při působení  $0g$ .



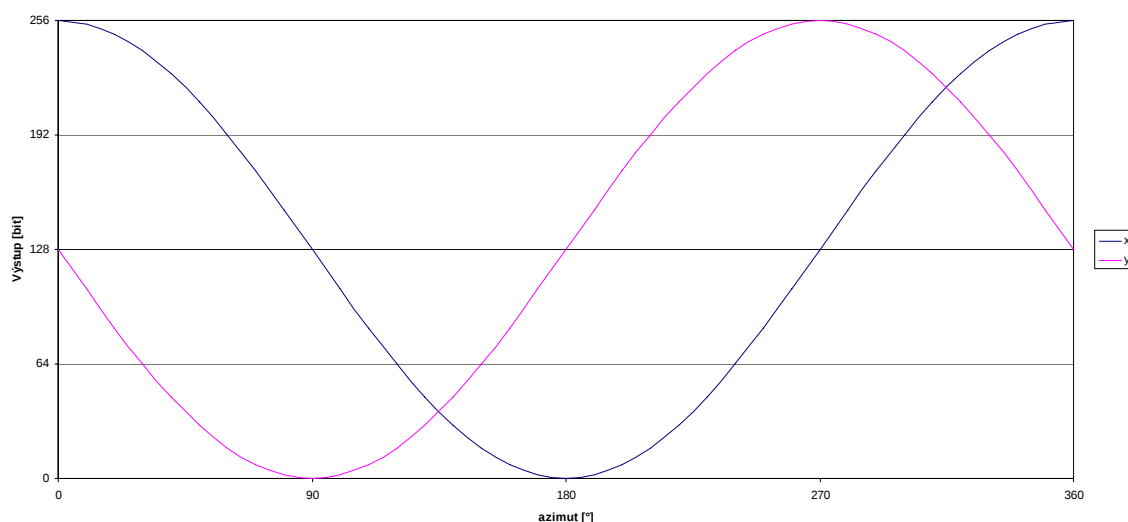
Obrázek 17: Nelinearita výstupu akcelerometru ACC7260

### 4.3 VÝSTUPY ELEKTRONICKÉHO KOMPASU CMPS03

Výrobce udává v katalogovém listu, že je možné si v registrech kromě hodnoty azimutu přečíst i jednotlivé hodnoty z jednotlivých snímačů magnetického pole. Údaj o azimutu tak lze získat přímo nebo jej vypočítat z údajů jednotlivých snímačů.

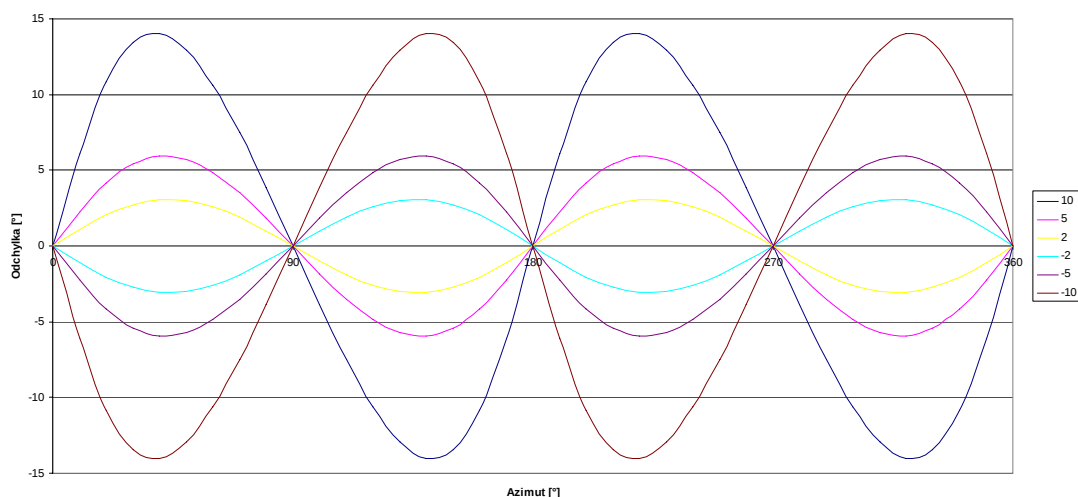
Protože kompas CMPS03 měří magnetické pole jen ve dvou osách, lze předpokládat, že měřený údaj azimutu bude závislý na naklonění kompasu. Při naklonění kompasu dochází ke změně velikostí měřených magnetických vektorových složek a dochází tak ke zkreslení údaje o azimutu. Pro možné provedení korekce je potřeba znát jednotlivé hodnoty vektorů magnetického pole.

Protože výrobce neuvádí, jaké hodnoty jsou uloženy v registrech od snímačů, byly tyto hodnoty změřeny pro jednotlivá úhlová natočení kompasu. Bylo tak zjištěno, že signál uložený v registrech 4 a 5 odpovídá výstupnímu signálu pro senzor v ose  $x$  a signál uložený v registrech 6 a 7 odpovídá výstupnímu signálu senzoru v ose  $y$ . Údaje uložené v registrech 8, 9 a 10, 11 jsou kalibrační hodnoty jednotlivých snímačů KMZ51.



**Obrázek 18: Výstupní hodnoty elektronického kompasu CMPS03 při  
 vodorovné rotaci**

Měření závislosti na naklonění elektronického kompasu CMPS03 bylo provedeno pro náklon pitch (předozadní náklon) v rozmezí 0 až  $\pm 10^\circ$  na nakloněné rovině a azimut 0-360°, údaj o azimutu byl čten přímo z registrů elektronického kompasu.



**Obrázek 19: Odchylka změřeného azimutu pomocí CMPS03 při náklonu elektronického kompasu**

## 5. REALIZACE

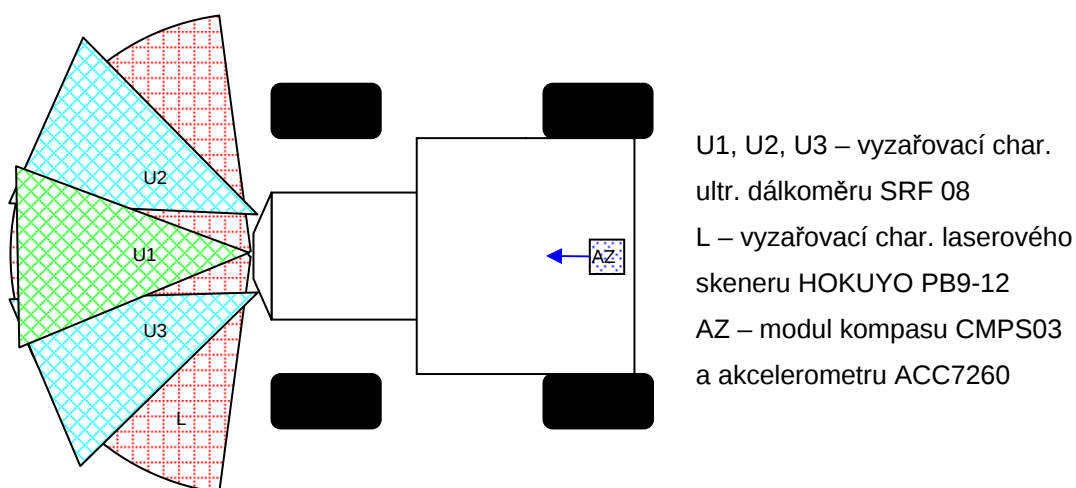
Tato kapitola popisuje navržené řešení senzorického systému, vysvětlení umístění senzorů a návrh řídicí desky. Navržený senzorický subsystém obsahuje tři ultrazvukové dálkoměry SRF08, laserový skener Hokuyo PB9-12, elektronický kompas CMPS03, akcelerometr ACC7260 a řídicí jednotku senzorického subsystému s mikroprocesorem ATmega8.

### 5.1 UMÍSTĚNÍ SENZORŮ

Nezanedbatelnou částí je umístění senzorů na robotu, tak aby dokázaly podávat řídicí jednotce správné informace o okolí robotu. Na základě vyzařovacího diagramu jsou vepředu na robotu umístěny tři ultrazvukové dálkoměry SRF 08 s vyznačenými vyzařovacími diagramy U1, U2 a U3 na obr. 20. Jeden ultrazvukový senzor je umístěn v ose robotu a jeho vyzařovací diagram U1 směřuje dopředu před robota a pokrývá prostředí před robotem. Další dva ultrazvukové dálkoměry jsou umístěny s odklonem  $20^\circ$  od osy robotu a pokrývají oblast před robotem při maximálně vytočené přední nápravě robotu. Odklon  $20^\circ$  je zvolen pro částečné překrytí jednotlivých diagramů, z důvodu závislosti vyhodnocení překážky v okrajích vyzařovacích diagramů na jejím natočení k senzoru, a pokrytí prostoru před robotem při maximálním zatáčení. Zároveň tak vzniklo před robotem pět výsečových oblastí, které jsou dále rozděleny na vzdálenost 0 - 0,3 m a 0,3 m a více, určující pozici překážky před robotem. V případě překážky v ose robotu, je tato vyhodnocena jen ultrazvukem s vyzařovacím diagramem U1. Nachází-li se překážka napravo od robotu je vyhodnocena ultrazvukem s vyzařovacím diagramem U2. Nachází-li se mezi osami vyzařovacích diagramů U1 a U2, je překážka vyhodnocena ultrazvukovými dálkoměry s diagramy U1 a U2 společně. Rozdělení těchto výsečí podle vzdálenosti pak určuje, zda tato překážka bude robotem objeta nebo robot před ní zastaví. Všechny tři senzory jsou uchyceny pomocí držáku zhotoveného z laminátové desky tloušťky 2 mm uvedené v příloze 8.

Pod držákem ultrazvukových dálkoměrů je v ose robotu umístěn laserový skener pro detekci překážek, uchycený pomocí čtyř šroubů M4. Jeho vyzařovací diagram je na obr. 20 označen L a červenou barvou.

Laserový skener i ultrazvukové dálkoměry mají na robotu stejnou úlohu a to detekovat překážku před robotem. Protože tyto dva typy senzorů používají jiný princip detekce překážky, měla by se tak zvýšit pravděpodobnost vyhodnocení překážky před robotem. A to i v případech kdy jeden z typů snímání vzdáleností selže, např. překážka není ve výšce laserového paprsku, překážka pohltila nebo odrazila jinam vyslaný paprsek, apod.



**Obrázek 20: Umístění senzorů na robotu a znázornění jejich vyzařovacích diagramů**



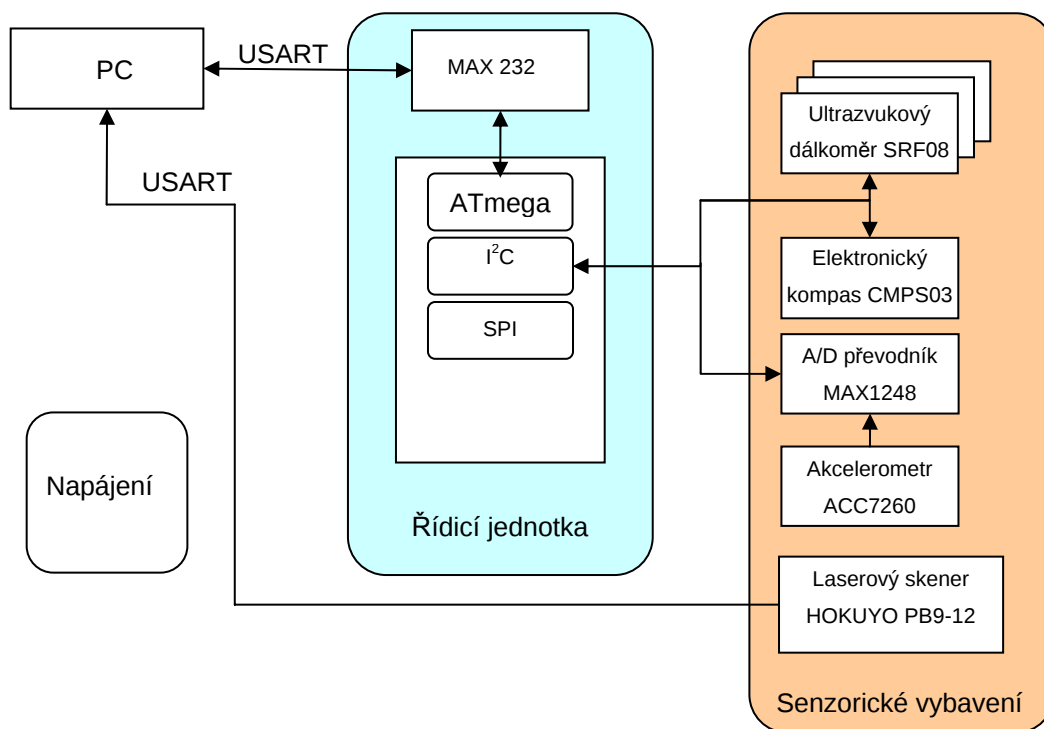
**Obrázek 21: Uchycení ultrazvukových senzorů na předním panelu robotu**

Dalším umístěným senzorem je kompas, na obr. 20 označen jako AZ a znázorněn modrou barvou. Sever kompasu je situován ve směru jízdy robotu a znázorněn šipkou. Kompas je náchylný na magnetické rušení, proto musí být umístěn co nejdále od zdrojů magnetického rušení. Aby byl co nejméně rušen, nelze jej umístit přímo do robotu, který je tvořen kovovou kostrou s pohonem elektrickými motory. Proto je kompas umístěn vně těla robotu pod uchycením kamery. Držák je zhotoven z nekovového materiálu z důvodu možného ovlivňování kompasu kovovými materiály.

## 5.2 MODUL ŘÍDICÍ JEDNOTKY

Modul řídicí jednotky slouží k zpracování dat a předání je řídicímu počítači z ultrazvukových dálkoměrů SRF08, elektronického kompasu CMPS03 a akcelerometru ACC7260. Tento modul nezpracovává informace z laserové skeneru, který je přímo připojen k řídicímu počítači pomocí sériového rozhraní.

### 5.2.1 Popis modulu



Obrázek 22: Blokové schéma senzorického subsystému

Modul řídicí jednotky senzorického subsystému je realizován pomocí mikrokontroléru AVR ATmega8, který zabezpečuje předávání získaných dat ze senzorů nadřazenému PC a komunikaci s jednotlivými senzory pomocí rozhraní I²C za účelem měření. Naměřená data dále upravuje, tak aby je bylo možné poslat nadřazenému PC.

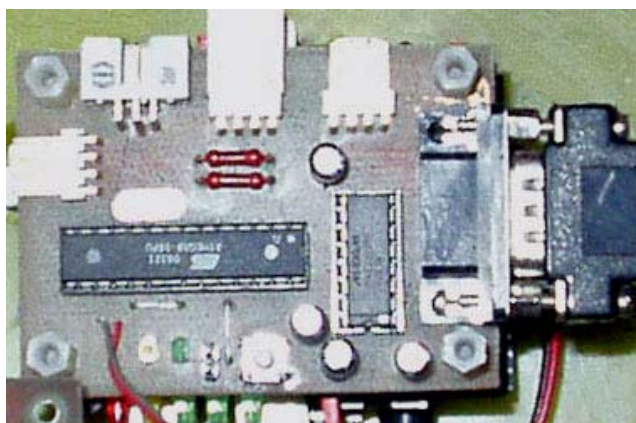
Modul obsahuje programovací konektor PROG pro přímé programování mikrokontroléru na desce přes rozhraní ISP, bez nutnosti odpojovat mikrokontrolér od připojených senzorů. Dále je možno stiskem resetačního tlačítka modul vyresetovat.

Pro indikaci stavu modulu je použito dvou LED. LED1 indikuje napájení modulu, LED2 indikuje komunikaci přes SPI při programování.

### **5.2.2 Popis zapojení**

Vzhledem k tomu, že řídicí modul tvoří mikrokontrolér, je použito minimální množství součástek sloužících především k ošetření vstupů. Zapojení modulu se odvíjí od pinů mikrokontroléru ATmega8 s programováním pomocí rozhraní ISP. Kompletní schéma modulu řídicí jednotky je uvedeno v příloze 1.

Pro programování mikrokontroléru slouží konektor PROG obsahující signály ISP a napájení: /RESET, GND, SCK, MISO, MOSI, +5V. Pro programování není potřebné externí napájení a lze desku napájet přímo z programátoru.



**Obrázek 23: Modul řídicí jednotky senzorického vybavení**

Jednotka sériového rozhraní USART mikrokontroléru ATmega8 je připojena k převodníku TTL/CMOS, který je realizovaný obvodem MAX232 od firmy Maxim. Takto upravený signál sériového rozhraní lze připojit k PC pomocí RS-232.

Pro komunikaci se senzory je použito rozhraní TWI (kompatibilní s I²C) vyvedené na konektory 1 a 2 s komunikační rychlostí 100kHz. Které je doplněno o pull-up rezistory přímo na desce plošného spoje. Při pohledu na desku ze strany součástek, kdy konektor X1 směřuje dolů, jsou jednotlivé vstupy v tomto pořadí shora: GND, SCL, SDA, +5V. Toto rozmístění odpovídá vstupům ultrazvukového dálkoměru SRF08. Pro komunikaci s externími A/D převodníky či jinými obvody slouží konektor SPI, na který je připojeno rozhraní SPI.

Napájení modulu a jednotlivých senzorů je +5V pomocí konektoru J1 s odběrem proudu do 300 mA.

### **5.2.3 Postup osazení desky**

Deska plošných spojů je uvedena v příloze 2. Je navržena jako jednovrstvá deska plošného spoje s využitím součástek SMD. Před vlastním osazením desky je vhodné vizuálně zkontrolovat DPS zda neobsahuje zkratky či přerušení některých spojů. Lze tak předejít určitým problémům při ožívování modulu. Při osazování desky modulu je vhodné postupovat od SMD součástek k největším součástkám na desce plošného spoje. Místo mikrokontroléru je na desce osazena precizní patice DIL28, do které je po osazení celé desky mikrokontrolér vložen. Stejným způsobem je osazen i obvod MAX232, který je vložen do precizní patice DIP16.

## **5.3 MODUL KOMPASU**

Modul kompasu je realizován na samostatné desce plošného spoje, aby jej bylo možné umístit mimo tělo robotu a nebyl tak ovlivňován elektromagnetickým polem elektromotorů.

### **5.3.1 Popis zapojení**

Deska plošného spoje je osazena konektorem pro I²C, který zabezpečuje jak napájení kompasu, tak i jeho komunikaci s řídicí jednotkou. Signály I²C jsou na konektoru v tomto pořadí: +5V, SDA, SCL, GND. Na desce je zároveň umístěn

konektor pro akcelerometr ACC7260 a piny pro nastavení citlivosti akcelerometru. Pro převod výstupního analogového signálu akcelerometru ACC7260 je použit A/D převodník PSC8591 s výstupem na sběrnici I²C. Naproti konektoru akcelerometru je na desce umístěn precizní konektor pro elektronický kompas CMPS03. Sever elektronického kompasu CMPS03 je situován do osy *x* akcelerometru ACC7260. Napájení modulu kompasu je indikováno pomocí LED. Schéma zapojení je uvedeno v příloze 4.

### **5.3.2 Postup osazení desky**

Deska plošného spoje je navržena jako jednovrstvá. Schéma je uvedeno v příloze 5. Před vlastním osazení desky je vhodné vizuálně zkontrolovat DSP zda neobsahuje zkratky či přerušení některých spojů. Lze tak předejít určitým problémům při oživování modulu. Při osazování desky modulu je vhodné postupovat od nejmenších součástí k největším.

Konektor pro akcelerometr ACC7260 je realizován ze dvou lámacích lišt po 4 dutinkách. Při osazování je potřeba dodržet kolmé osazení na desce plošného spoje a rozteč mezi řadou lišt. Při nedodržení by nemusel jít akcelerometr do takto vzniklého konektoru vůbec vsadit a nebyla by zaručena vodorovnost měřicích os s deskou plošného spoje, která je důležitá pro další uchycení modulu.

Konektor pro elektronický kompas CMPS03 je realizován pomocí lámací zdířkové lišty s 9 dutinkami. Při jeho osazení je třeba dbát jeho kolmého osazení na desce plošného spoje. Místo A/D převodníku PCF8591 je na desce osazena precizní patice DIL16, do které je po osazení celé desky mikrokontrolér vložen.

## 6. POPIS OBSLUŽNÉHO PROGRAMU

Nezbytnou součástí pro funkčnost řídicí jednotky je její programové vybavení realizující získání a úpravu měřených dat a následné předávání těchto dat 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. Program je členěn do funkčních bloků tvořených samostatnými funkcemi pro přehlednost psaného kódu a případné úpravy při následné aktualizaci či opravách chyb v programu.

### 6.1 KOMUNIKACE S PC

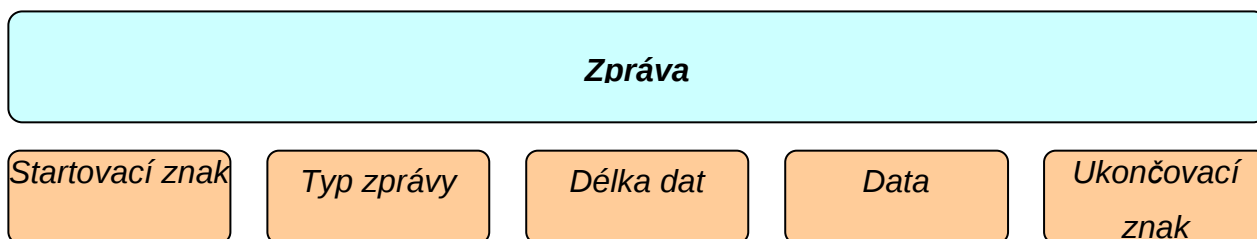
Komunikace s nadřazeným PC je realizována pomocí sériové linky s převodníkem úrovně TTL/CMOS. Jednotka USART na mikrokontroléru je nastavena následovně:

- BaudRate: 38 400 b/s
- Mód: asynchronní
- Počet datových bitů: 8
- Počet Stop bitů: 1
- Parita: žádná

#### 6.1.1 Komunikační protokol

Navržená komunikace je obousměrná tak, že nadřazené PC se dotazuje na informace z jednotlivých snímačů a řídicí jednotka tyto informace získané ze senzorů předává nadřazenému PC. Pro tuto komunikaci je upraven komunikační protokol robotu navržený Bc. Michalem Sittou pro řídicí elektroniku. [15] Tvar komunikační zprávy je stejný v celém robotu, pouze se liší používaným typem zpráv.

Protokol pro komunikaci je bitově orientovaný a používá znaků ASCII tabulky. Základní struktura protokolu je uvedena níže na obr. 24.



**Obrázek 24: Protokol zprávy**

Každá zpráva je uvozena znakem *BELL* (0x07h). Následuje *typ zprávy* tvořený třemi byty tisknutelných znaků ASCII označující dotaz na řídicí jednotku. Následuje dvojice bytů označující *délku datové zprávy*. Délka datové zprávy je omezena na maximálně 256 poslaných bytů dat. Následují *přenášená data*, která však nemusí být u každé zprávy vložena. Při dotazu z PC na řídicí jednotku jsou už přenesena typem zprávy. Na závěr je vložen *ukončovací znak* s významem konce řádku (0x0Ah).

#### 6.1.1.1 Typy zpráv

Pro potřeby získání informací z jednotlivých senzorů byly vytvořeny následující zprávy:

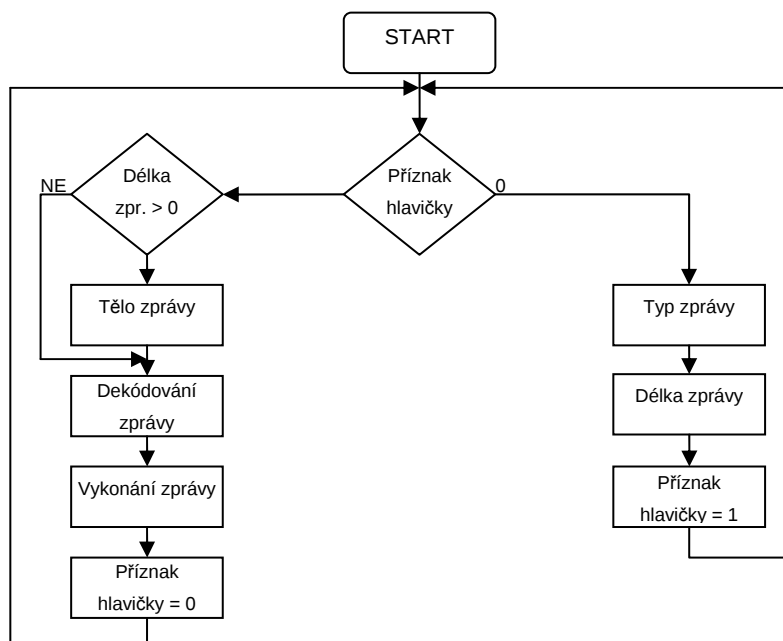
Pro zjištění azimutu robotu je zaslána hlavička zprávy *AZI*. Při obdržení zprávy řídicí jednotka odpoví se stejnou hlavičkou a datovou částí ve tvaru *xxx.x* obsahující informaci o azimutu robotu. Další zprávou pro zjištění informací z elektronického kompasu je zpráva *AZ1* a *AZ2*. Při obdržení jedné z těchto zpráv řídicí jednotka odpoví stejnou hlavičkou a datovou částí ve tvaru *xxxx* obsahující informaci o magnetického složce příslušného snímače magnetického pole na kompasu *CMPS03* tvořeného dvěma snímači *KMZ51* navzájem pootočenými o 90°.

Další zprávou je *ACx*, kde *x* označuje osu akcelerometru. Při obdržení této zprávy, řídicí jednotka odpoví se stejnou hlavičkou a datovou částí ve tvaru *x.xx* obsahující informaci o zrychlení v dané ose robotu.

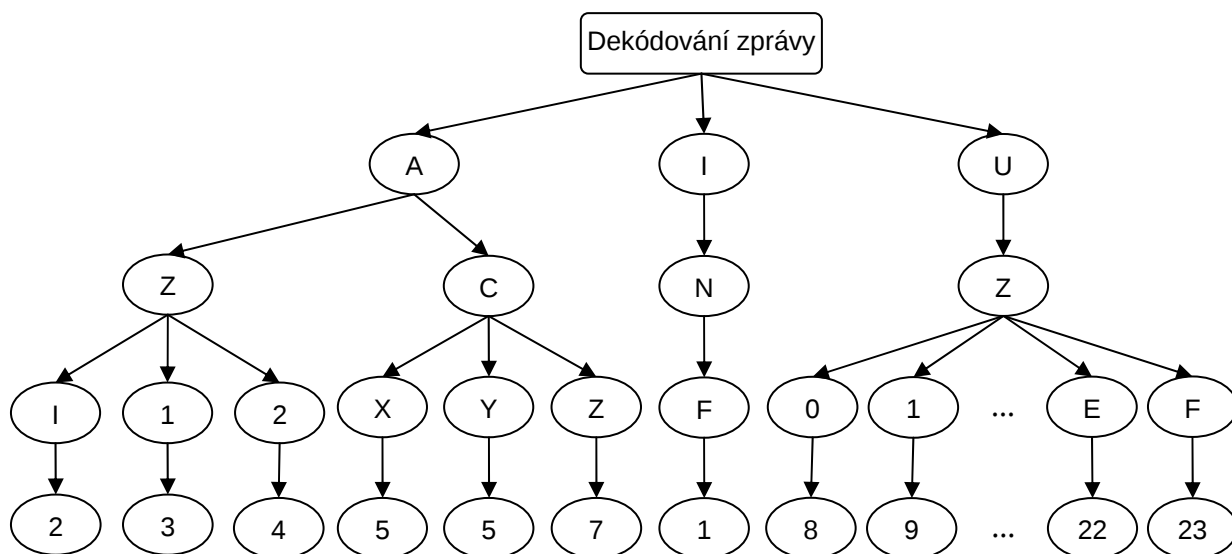
Poslední zprávou je UZ $x$ , kde  $x$  označuje číslo ultrazvukového dálkoměru. Řídicí jednotka po obdržení této zprávy odpoví stejnou hlavičkou a datovou částí ve tvaru xxx. V tomto případě datová část reprezentuje vzdálenost detekovaného odrazu ultrazvuku. Jednotlivé typy zpráv jsou uvedeny v příloze 7.

### 6.1.2 Dekódování zprávy ze sériové linky

Dekódování zprávy probíhá v nekonečné smyčce s následujícími kroky. První krok načte typ zprávy, druhý krok načte délku zprávy a třetí krok načte datovou část zprávy. Průběh dekodování zprávy je znázorněn na obr. 25. Dekódování zprávy je realizováno pomocí rozhodovacího stromu znázorněného na obr. 26.



Obrázek 25: Vývojový diagram načítání zprávy z PC



Obrázek 26: Rozhodovací strom pro dekódování typu zprávy

### 6.1.3 Odpověď na přijatou zprávu

Po dekódování přijaté zprávy probíhá ihned její zpracování s okamžitou odpovědí nadřazenému PC. Odpověď na přijatou zprávu je realizována samostatnou funkcí s přepínačem, který podle identifikačního čísla zprávy vykoná požadovanou sekvenci příkazů. Ty jsou nejčastěji tvořeny zápisem příslušné hodnoty do registru nebo naopak vyčtením hodnoty registru požadovaného snímače přes sběrnici I²C. Odpověď je pak tvořena přijatou hlavičkou zprávy a následující datovou informací ze senzoru.

## 6.2 KOMUNIKACE SE SENZORY

Všechny senzory připojené k řídicí jednotce komunikují pomocí sběrnice I²C s komunikační rychlostí nastavenou na 100kHz. Naměřené hodnoty senzorů jsou uloženy v jejich registrech. Proto byly vytvořeny základní funkce pro čtení a zápis z těchto registrů.

Funkce *i2c_write_bytes* slouží pro zápis do příslušného registru adresovaného senzoru. Vstupem této funkce je adresa zařízení, registr a zapisovaná hodnota do registru. Naopak pro vyčítání hodnot z registrů u snímačů připojených rozhraním I²C slouží funkce *i2c_read_bytes*, která přečte hodnotu registru adresovaného zařízení.

Jejími vstupy je ukazatel na adresu zařízení, ze kterého se bude číst a ukazatel na registr, který bude přečten. Výstupem funkce je hodnota přečteného registru.

Před vlastním zahájením komunikace se nejprve spustí test, kterým se zjistí, zda je senzor připojen. Pokud není, pokračuje se testem u dalšího senzoru. Je-li senzor přítomen, zahájí se spojení.

U kompasu pouze přečte změřená data, jelikož kompas měří nezávisle na komunikaci (každých 40ms) a na sběrnici posílá poslední naměřená data. Ultrazvukové snímače a A/D převodník začne měřit až po příslušném signálu, který přijde ze sběrnice. Díky kontrole připojení, je možné senzory připojit, či odpojit, bez nutnosti změnit program v řídicí jednotce.

## 7. TESTOVACÍ PROGRAM

Z důvodu testování senzorického vybavení mimo tělo robotu pracujícího na operačním systému ArchLinux byl vytvořen testovací program RobTest pracující v prostředí MS Windows. Implementaci algoritmů z testovacího programu do prostředí operačního systému ArchLinux následně provedl Tomáš Skočdopole.

### 7.1 PROGRAM ROBTEST

Program RobTest je vytvořen v prostředí MS VisualStudio 2008 a poskytuje základní informace z připojených senzorů, kromě informací z laserového skeneru. Komunikační okno programu je zobrazeno na obr. 27. Program se po spuštění cyklicky dotazuje na informace z připojených modulů. Před spuštěním programu je potřeba nastavit port, ke kterému je řídicí jednotka připojena a přenosová rychlost. Zatržením políčka *Aktiv* lze vybrat snímače, na které se program bude dotazovat. Program RobTest nemá ošetřen stav, kdy je zatrženo políčko *Aktiv* a daný senzor není k modulu připojen. Program se spustí tlačítkem *Connect*, následně se v příslušném okně programu zobrazí přijaté hodnoty.

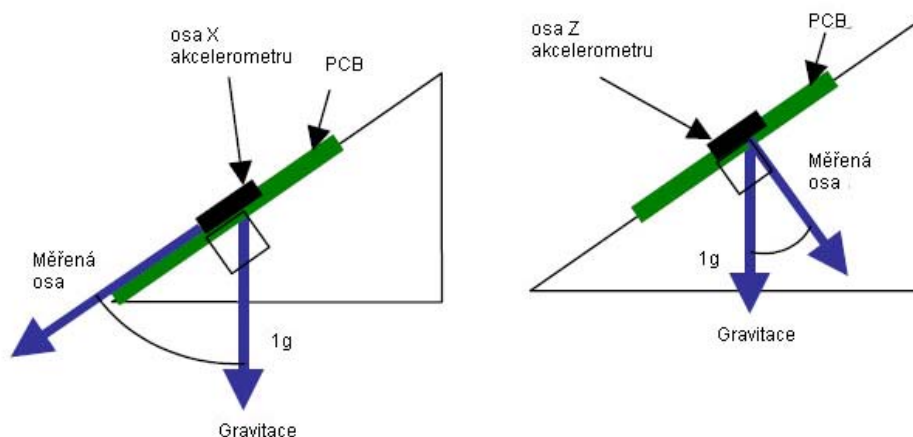


Obrázek 27: Testovací program RobTest

Zatržením políčka kompenzace a vyplněním údajů o deklinačním úhlu dojde u modulu kompasu k výpočtu azimutu na základě informací z jednotlivých snímačů magnetického pole umístěných na kompasu a informace o náklonu robotu. Při nezatržení se zobrazuje informace o azimutu přímo z kompasu.

## 7.2 VÝPOČET NÁKLONU

Pro výpočet úhlu náklonu je nutné znát jednotlivé složky gravitačního zrychlení v jednotlivých měřených osách X, Y a Z, jak je uvedeno na obrázku 28.



**Obrázek 28: Složky gravitačního zrychlení působící na osu X a Z**

Jelikož výstupní charakteristika není v celé své šířce lineární, tak nejmenší chybovosti při měření náklonu se dopustíme v lineární části charakteristiky, která se nachází v intervalu od  $-45^\circ$  do  $+45^\circ$ .

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

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

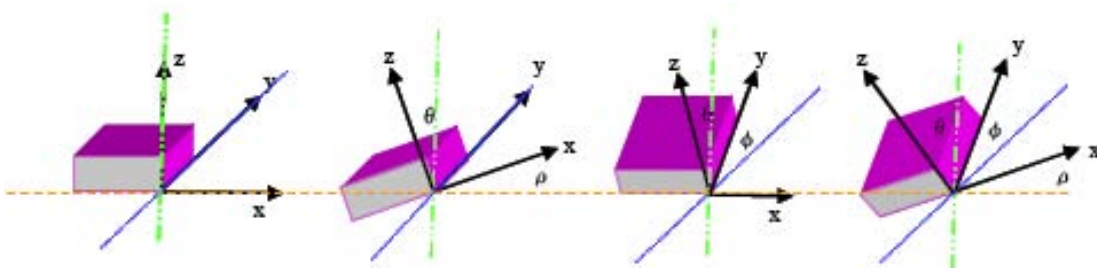
kde  $V_{OUT}$  je výstupní napětí akcelerometru,

$V_{OFFSET}$  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 29: Vymezení úhlů a složek gravitačního zrychlení**

Pro jednotlivé úhly náklonu v příslušné ose robotu lze pak psát následující rovnice:

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

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

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

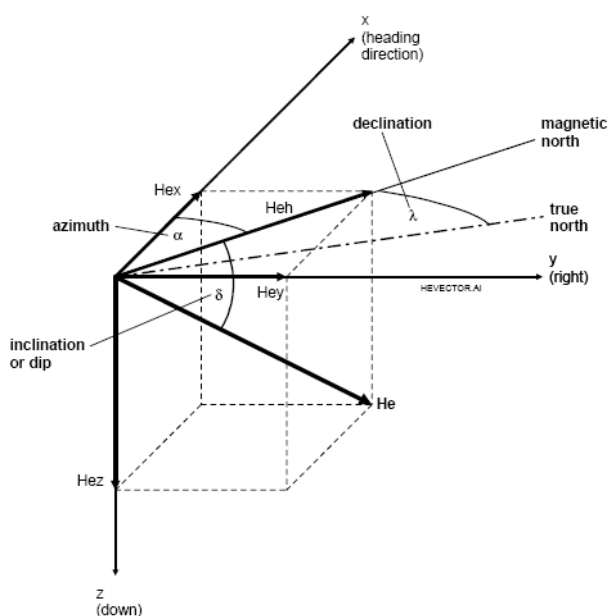
Zároveň se výsledná suma zrychlení všech os musí rovnat statickému zrychlení  $1g$ .

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

Pro práci robotu bude stačit počítat pouze odklon od zemského povrchu, což odpovídá úhlům  $\rho$  a  $\varphi$ . Na základě těchto úhlů lze provést korekci elektronického kompasu, případně zastavit robota, v případě hrozby jeho převrácení.

### 7.3 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 30. 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 ukazujícím skutečný geografický sever. Tato hodnota je závislá na geografické poloze a 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. Roční změna deklinačního úhlu v ČR je přibližně  $6'$ . V roce 2010 je ve městě Brně deklinační úhel  $\lambda = +3^\circ 21'$ . [12]



Obrázek 30: Složky magnetického pole Země [11]

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  $H_{zc}$ . [14] Složky horizontálního magnetického pole lze získat vyčtením z registrů 4,5 a 6,7 z modulu elektronického kompasu CMPS03. Tyto hodnoty magnetického pole v ose  $X$  a  $Y$  je nutno nejprve normalizovat.

$$X_{mc} = (Hex - Bias_x) \cdot SF_x, \quad (9)$$

$$Bias_x = \frac{Hex_{\max} + Hex_{\min}}{2}, \quad (10)$$

$$SF_x = \frac{2}{Hex_{\max} - Hex_{\min}}, \quad (11)$$

kde  $_x$  je osa  $X$ ,  $Hex$  je výstup senzoru v ose  $X$ ,  $X_{mc}$  je normalizovaná hodnota výstupu a  $Hex_{\max}$  a  $Hex_{\min}$  jsou maxima a minima výstupních hodnot. Normalizace v ose  $Y$  je dosaženo stejným způsobem jako v ose  $X$ .

Na základě odvozených vět v článku [14] platí pro normalizovaný výstup kompasu tato rovnice:

$$X_{mc}^2 + Y_{mc}^2 + Z_{mc}^2 = 1 \quad (12)$$

a normalizovaná složka  $Z_{mc}$  magnetického pole je:

$$Z_{mc} = \pm \sqrt{1 - (X_{mc}^2 + Y_{mc}^2)} \quad (13)$$

Ze všech získaných normalizovaných složek magnetického pole  $X_{mc}$ ,  $Y_{mc}$  a  $Z_{mc}$  a znalosti úhlů náklonu kompasu  $\varphi$  (úhel pitch) a  $\rho$  (úhel roll), je stanovení azimut následující:

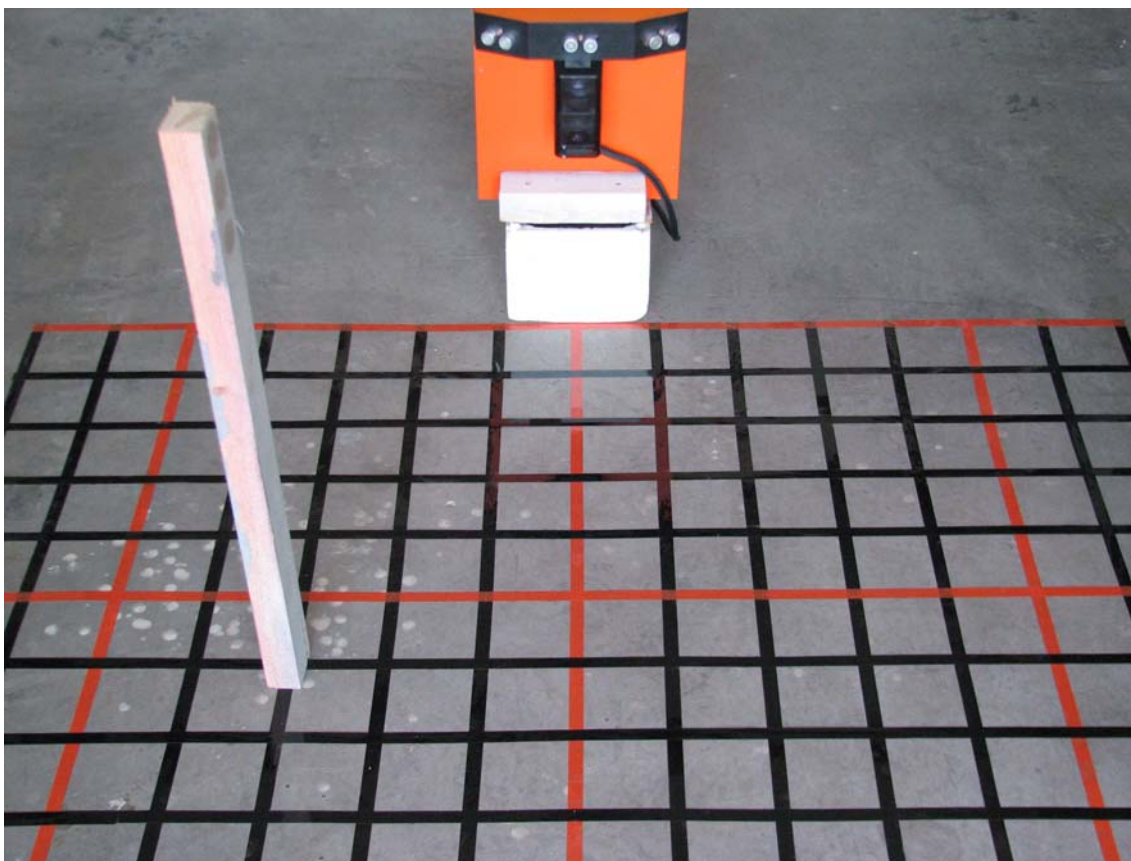
$$\alpha = \arctan \left( \frac{-Y_{mc} \cdot \cos \rho + Z_{mc} \cdot \sin \rho}{X_{mc} \cdot \cos \varphi + Y_{mc} \cdot \sin \varphi \cdot \sin \rho + Z_{mc} \cdot \sin \varphi \cdot \cos \rho} \right) - \lambda. \quad (14)$$

## 8. TESTOVÁNÍ SYSTÉMU

Testování systému pro lokální navigaci bylo provedeno jak v simulovaných podmínkách, tak i na soutěži Robotour.

### 8.1 TEST DETEKCE PŘEKÁŽEK

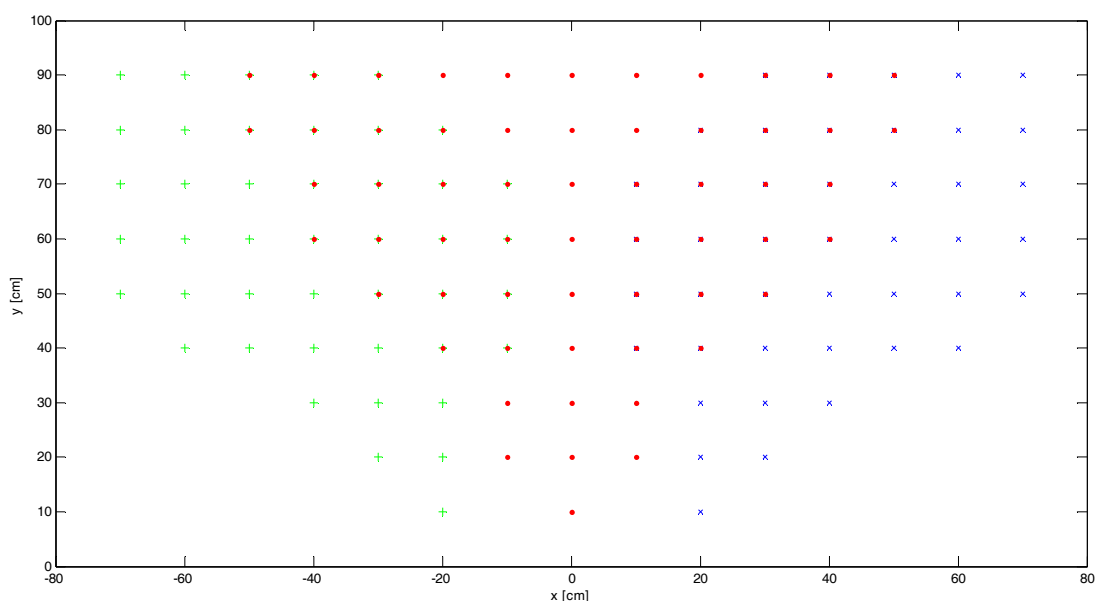
Pro otestování ultrazvukových dálkoměrů byla vytvořena souřadnicová mříž s rozlišením 10 cm, pomocí níž byl testován dosah a překrývání jednotlivých ultrazvukových dálkoměrů SRF08 a detekce překážek pomocí laserového skeneru Hokuyo PB9-12, obr. 31.



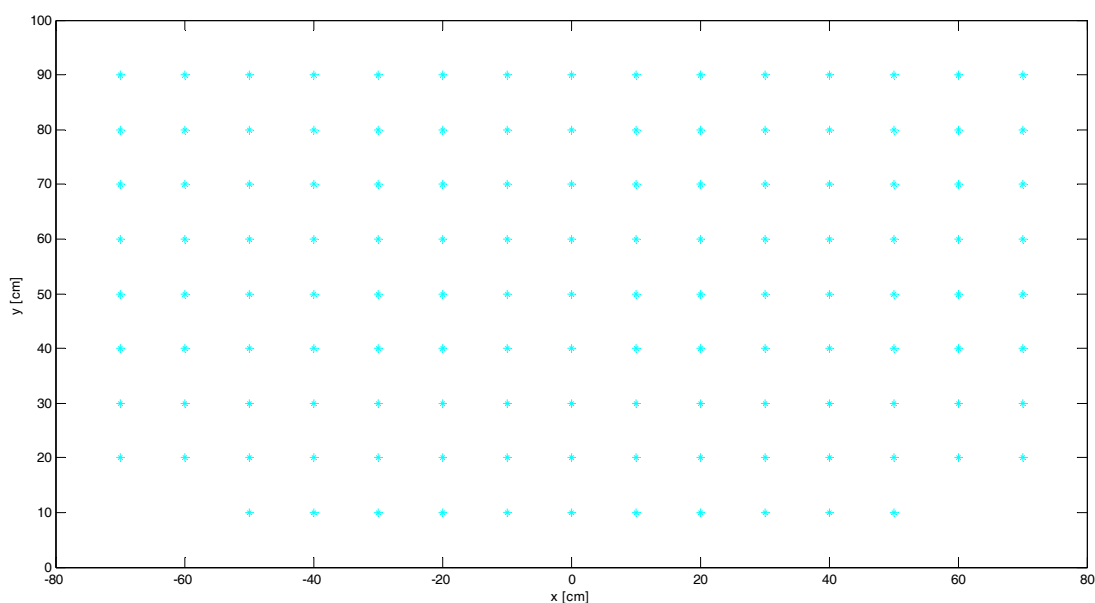
**Obrázek 31: Test detekce překážek před robotem**

Test byl prováděn tak, že držák s testovanými ultrazvuky byl umístěn na okraji testovací mříže ve stejné výšce, jako je umístěn na robotu. Následně na jednotlivé spojnice mříže byl vkládán dřevěný hranol o rozměrech 40 x 40 x 800 mm

a měřena vzdálenost od hlavní osy držáku ultrazvuků. Ta byla následně porovnávána s naměřenými údaji vzdálenosti z ultrazvuků. Bezpečně identifikovat překážku se při simulovaných podmínkách dařilo vyhodnotit ve vzdálenosti 10 – 80 cm ve směru vyzařovacích charakteristik a to i v případě natočení překážky k robotu hranou. Při natočené překážce hranou k robotu ve vzdálenosti 90 cm už docházelo k občasnému nevyhodnocení této překážky.



**Obrázek 32: Detekované překážky pomocí ultrazvukových dálkoměrů SRF08**

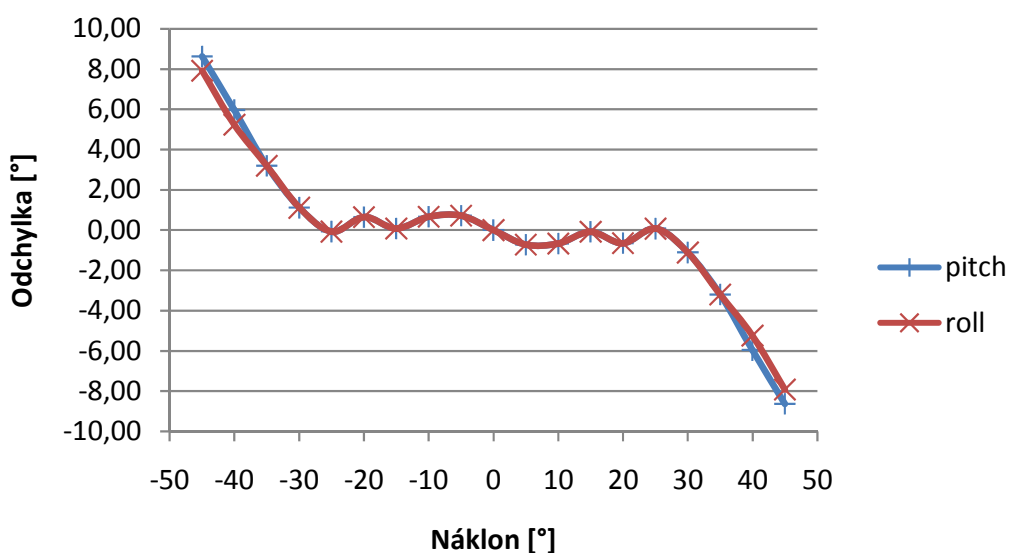


**Obrázek 33: Detekované překážky pomocí laserového skeneru Hokuyo PB9-12**

Při testování na robotu jezdícího po rovině se podařilo dosáhnout obdobných výsledků vyhodnocení překážky jako u testování mimo tělo robotu. Jen s tím rozdílem, že robot neměl implementovaný algoritmus pro měření vzdálenosti od překážky, ale jen zda se ve vzdálenosti 80 cm překážka nachází nebo nenachází. Problém s vyhodnocením pak nastal při jízdě, kdy docházelo ke změně jízdní roviny (přechod jízdy z roviny do kopce a přechod jízdy z kopce na rovinu). V tomto případě došlo k odrazu od terénu před robotem a následnému vyhodnocení že je před robotem překážka, která je blíže než 80 cm. Proto byla zkrácena vyhodnocovací vzdálenost překážky od robotu na 70 cm. Po této úpravě už nedochází vlivem mírného naklonění robotu k detekci terénu před robotem a robot je tak schopen jízdy i v terénu s mírnou změnou nerovností. V případě velkého náklonu robotu v terénu však může dojít k opětovnému vyhodnocení terénu před robotem, že se zde nalézá překážka.

## 8.2 TEST MĚŘENÍ NÁKLONU ROBOTU POMOCÍ ACC7260

Testování měření náklonu bylo provedeno nejprve mimo tělo robotu na naklápací rovině při maximální citlivosti 800mV/g akcelerometru ACC7260 pro úhly náklonu  $0^\circ$  až  $\pm 45^\circ$ . Podle vztahu (4) bylo stanoveno gravitační zrychlení v každé měřené ose akcelerometru. Z vypočteného zrychlení v každé ose byl stanoven podle vztahů (5) a (6) náklon pitch (předozadní náklon) a roll (levoprávní náklon) a zjištěna odchylka od skutečného náklonu.

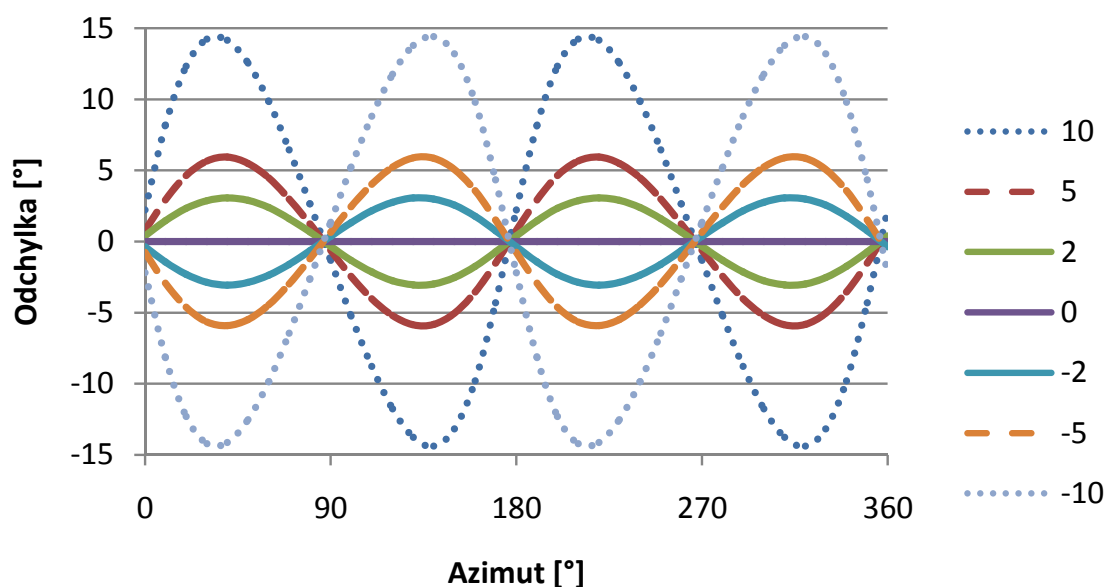


**Obrázek 34: Odchylka změřeného náklonu pitch a roll pomocí akcelerometru ACC7260**

Obdobných výsledků měření náklonu bylo dosaženo i při testování akcelerometru umístěného na stojícím robotu. Při jízdě robotu však měření bylo v jednotlivých osách zatíženo dynamickým zrychlením působícího na robot. Výpočet náklonu robotu z naměřených údajů zrychlení akcelerometrem nebyl správný, ale zatížen dynamickou chybou způsobenou dynamickými složkami zrychlení. Správné měření náklonu robotu je tak jedině možné jen v případě, kdy je robot v klidu.

### 8.3 TEST MĚŘENÍ AZIMUTU ROBOTU

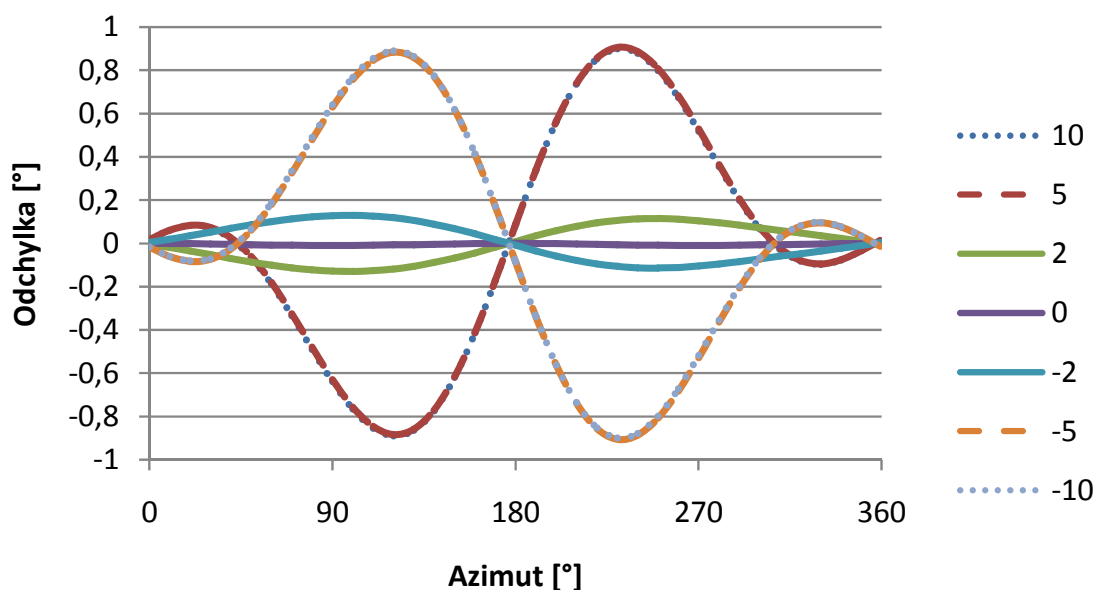
Testování měření azimutu bylo stejně jako předchozí měření nejprve provedeno mimo tělo robotu, aby se předešlo ovlivňování kompasu CMPS03 konstrukcí robotu. Měření bylo provedeno na naklápěcí rovině pro úhly náklonu  $0^\circ$ ,  $\pm 2^\circ$ ,  $\pm 5^\circ$  a  $\pm 10^\circ$  pro náklon pitch (předozadní náklon ve směru severu kompasu) pro elektronicky nevyvážený a vyvážený kompas. Získaný údaj o azimutu byl porovnáván s turistickým kompasem s rozlišením  $2^\circ$ . U nevyváženého kompasu je informace o azimutu přímo získávána z registru kompasu. Údaje měřené pomocí nenakloněného elektronického kompasu se shodovaly  $\pm 2^\circ$  s informacemi turistického kompasu. V případě naklonění elektronického kompasu docházelo k rozdílnému měření až o  $\pm 15^\circ$ .



Obrázek 35 Odchylka azimutu při náklonu kompasu CMPS03 bez vyvážení

Vyvážení kompasu je provedeno na základě uvedených vztahů (9), (10), (11), (13) a (14). Ze znalosti jednotlivých vodorovných složek magnetického pole získaných z příslušných registrů kompasu a vypočteného náklonu pitch a roll získaného pomocí akcelerometru ACC7260 je vypočten pomocí vztahu (13) svislý vektor magnetického pole Země.

Ze znalosti deklinačního úhlu  $\lambda$  pro město Brno v roce 2010, vypočteného svislého vektoru magnetického pole a vypočteného náklonu kompasu pitch a roll je provedena korekce vodorovných složek magnetického pole a z nich následně stanoven azimut robotu.



**Obrázek 36: Odchylka azimutu při náklonu kompasu CMPS03 s vyvážením**

Při použití vyvážení elektronického kompasu bylo dosaženo přesnějšího měření úhlu azimut, maximální odchylka od údajů turistického kompasu byla  $\pm 1^\circ$  i při náklonu  $\pm 10^\circ$ . Úplné kompenzace náklonu se nepodařilo dosáhnout.

Při testování elektronického kompasu na robotu byl modul umístěn pod uchycením kamery, byl tak nejdále od elektrických motorů (potenciálního zdroje rušení). Při stojícím robotu bylo dosaženo obdobných výsledků jako při testování kompasu mimo tělo robotu, včetně vyvažování kompasu. Při jízdě robotu však vyvážení kompasu nelze použít, jelikož je akcelerometr zatížen dynamickým zrychlením a nedokáže tak bezpečně určit náklon robotu. Z tohoto důvodu lze určovat azimut jen při stojícím robotu, kdy je robot v klidu.

#### 8.4 TEST SYSTÉMU LOKÁLNÍ NAVIGACE

Celý systém robotu TIM2 byl otestován na robotické soutěži Roboutr 2009. Zde se nejlépe ověřila funkčnost systému vyhýbat se překážkám. V případě vyhodnocení překážky v blízkém okolí robotu, robot z bezpečnostních důvodů zastavil a zvukovým znamením oznámil, že našel překážku, které se nedokáže vyhnout. Z důvodu menší ovladatelnosti Ackermanova podvozku tato oblast blízkého okolí robotu byla 0 – 0,3m před robotem. Důsledkem této bezpečné vzdálenosti bylo, že při jízdě po okraji cesty došlo k vyhodnocení odpadkového koše na okraji cesty jako překážka v cestě, i když se nacházel mimo trasu robotu.



**Obrázek 37: Robotour 2009 – přejezd na startoviště a  
 odkrytá přední část robotu TIM2**

## 9. ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo seznámit se s problematikou lokální navigace robotu pro vnější prostředí, navrhnout a realizovat systém pro lokální navigaci robotu a ten následně otestovat.

Řešení této diplomové práce bylo rozděleno do několika částí. V první části bylo provedeno seznámení se s problematikou lokální navigace ve vnějším prostředí, a principy měření okolí robotu ve vnějším prostředí. Druhá část práce byla zaměřena na výběr vhodných komponent pro realizování systému pro lokální navigaci. Byly zde zkoumány a vybírány jednotlivé senzory, součástky, které jsou na trhu dostupné a vhodné pro využití pro lokální navigaci, včetně výběru mikrokontroléru pro zpracování údajů. Následovalo proměření parametrů daných senzorů a návrh na jejich umístění na robotu. Navržení a realizace řídicí desky senzorického vybavení a vytvoření obslužného programu pro získávání a zpracování naměřených dat a předání těchto dat nadřazenému systému robotu. Na závěr bylo provedeno otestování celého systému jak v simulovaných tak i reálných podmínkách.

Senzorické vybavení pro lokální navigaci je tvořeno z ultrazvukových dálkoměrů SRF08, laserového skeneru Hokuyo PB9-12, elektronického kompasu CMPS03 a akcelerometru ACC7260. Ultrazvukové dálkoměry SRF08 jsou umístěny vpředu na robotu tak, aby bylo možné detekovat překážky v trase robotu. Jejich rozmístění pokrývá prostor před robotem a prostor po stranách robotu při maximálním zatáčení robotu. Vlivem překrývání vyzařovacích diagramů ultrazvukových dálkoměrů je prostor před robotem rozdělen do pěti sektorů, pomocí nichž lze detekovat polohu překážky. Podle polohy překážky pak lze upravit natočení přední nápravy tak, aby se dané překážce robot bezpečně vyhnul. Z důvodu větší bezpečnosti jsou tyto ultrazvukové dálkoměry doplněny o laserový skener, který snímá prostředí před robotem. V případě pohlcení nebo nevhodného odrazení vysílaného paprsku ultrazvukového nebo laserového senzoru tak může být překážka vyhodnocena druhým snímačem. Elektronický kompas CMPS03 a akcelerometr ACC7260 jsou umístěny na samostatném modulu mimo tělo robotu z důvodu snížení

ovlivnění elektronického kompasu. Konstrukcí tohoto modulu je zároveň zabezpečeno mechanické propojení obou senzorů pro korekci náklonu.

Navržená a realizovaná elektronika řídicí desky senzorického vybavení využívá mikrokontrolér AVR ATmega8 pro obsluhu použitých snímačů a komunikaci s nadřazeným systémem pomocí RS-232. Pro komunikaci s nadřazeným PC byl upraven komunikační protokol robotu, používaný pro řídicí členy robotu. Pro obsluhu senzorů byly vytvořeny základní funkce pro zápis a čtení registrů snímačů přes sběrnici I²C. Tyto funkce jsou použitelné s drobnými úpravami i pro jiné typy mikrokontrolérů AVR. Získané hodnoty snímačů uložené v jejich registrech tak lze jednoduše vyčítat pomocí jakéhokoli mikrokontroléru komunikujícího po sběrnici I²C. Po zapnutí modul řídicí desky vyčkává na příchozí zprávu z nadřazeného PC. Při přijetí zprávy tuto dekoduje, vykoná ji a odpoví nadřazenému PC v požadovaném tvaru zprávy.

K ověření správné funkce senzorového vybavení pro lokální navigaci a ověření vztahů pro výpočet náklonu a azimutu byl vytvořen program RobTest simulující posílání zpráv nadřazené řídicí jednotky v robotu TIM2. Pomocí programu RobTest byly jednotlivé části senzorového vybavení otestovány a ověřeny matematické vztahy pro výpočet náklonu a azimutu robotu. Výsledky jednotlivých měření jsou prezentovány ve formě obrázků a grafů, které jsou srozumitelnější než velké množství číselných hodnot.

Vyvinutý systém lokální navigace umožňuje robotu měřit okolí robotu a detekovat překážky před robotem. V případě vyhodnocení překážky ve větší vzdálenosti od robotu umožňuje robotu vyhnout se této překážce. Při vyhodnocení překážky v blízké vzdálenosti od robotu dojde k zastavení robotu a akustickému oznámení překážky. Zároveň zjišťuje natočení robotu k souřadnému systému, které dále předává globální navigaci robotu pro plánování trasy. Údaj o azimutu lze považovat za přesný jen v případě, kdy je robot v klidu a nepůsobí na něj žádné dynamické zrychlení z důvodu vyvažování kompasu. Přesnost výpočtu svislé magnetické složky závisí na přesnosti měření náklonu a jednotlivých vodorovných složek magnetického pole Země. Tuto nevýhodu by vyřešilo použití tříosého elektronického kompasu, který je ovšem cenově dražší.

## 10. LITERATURA

- [1] P. Novák: Mobilní roboty – pohony, senzory, řízení; 1. vydání; BEN technická literatura; Praha 2005; ISBN – 80-7300-1411
- [2] *Basic of sensors* [online]. EandM  
[http://www.eandm.com/eandm/training/siemenscourses/snrs_1.pdf](http://www.eandm.com/eandm/training/siemenscourses/snrs_1.pdf)  
[cit. 10. 3. 2010]
- [3] JOHN HOLLAND: *Designing autonomous mobile robots*, Elsevier; Burlington USA 2004; ISBN 0-7506-7683-3
- [4] J. BORENSTEIN, H. R. EVERETT, L. FENG, *Where I am? Sensors and Methods for Mobile Robot Positioning*; University of Michigan 1996
- [5] MURPHY, Robin. *Introduction to AI robotice*. Massachusetts Institute of Technology. 2000., ISBN 0-262-13383-0
- [6] KENNEDY, William. The Basics of Triangulation Sensors [online], CyberOptics Corp.  
<http://archives.sensorsmag.com/articles/0598/tri0598/> [cit. 12. 3. 2010]
- [7] BALUFF. *Indukční snímače* [on-line], Baluff.  
[http://www.balluff.cz/Download/katalogy/haupt/S10_0703_cz.pdf](http://www.balluff.cz/Download/katalogy/haupt/S10_0703_cz.pdf)  
[cit. 15. 3. 2010]
- [8] BALUFF. *Kapacitní snímače* [on-line], Baluff.  
[http://www.balluff.cz/Download/katalogy/haupt/S40_0703_cz.pdf](http://www.balluff.cz/Download/katalogy/haupt/S40_0703_cz.pdf)  
[cit. 15. 3. 2010]
- [9] HANKOVEC, D. *Sběrnice I2C, o co jde a jak pracuje* [online], DHservis. <http://www.dhservis.cz/iic.htm> [cit. 24. 3. 2010]
- [10] HANKOVEC, D. *Sériový kanál, o co jde a jak pracuje* [online], DHservis. <http://www.dhservis.cz/serial.htm> [cit. 24. 3. 2010]
- [11] Electronic Compass Design using KMZ51 and KMZ52, Philips Semiconductors
- [12] *Find the magnetic declination at your location* [online],  
<http://www.magnetic-declination.com/> [cit. 16. 4. 2010]

- [13] KALOVÁ Ilona, HORÁK Karel. *Optické metody 3D objektů* [online]. VUT Brno.  
<http://www.elektrorevue.cz/clanky/05023/index.html#kap2.2>  
[cit. 16. 4. 2010]
- [14] Seong Yun Cho, Chan Gook Park. *A Calibration Technique for a Two-Axis Magnetic Compass in Telematics Device* [online]. ETRI Journal. 2005, <http://etrij.etri.re.kr/Cyber/Download/PublishedPaper/2703/27-03-06.pdf> [cit. 16. 4. 2010]
- [15] SITTA, M. *Semestrální práce 1: Řízení kolového podvozku*, VUT 2009.
- [16] SKÁCEL, M. *Semestrální práce 1: Lokální navigace robotu pro vnější použití*, VUT 2009.
- [17] SKÁCEL, M. *Semestrální práce 2: Lokální navigace robotu pro vnější použití*, VUT 2009.
- [18] VÁŇA, V. *Mikrokontrolery Atmel AVR-Programování v jazyce C*. Praha, BEN- technická literatura, 2003. ISBN 80-7300-102-0.
- [19] *Katalogový list Atmel AVR ATmega8* [online].  
[http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc2486.pdf](http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc2486.pdf)  
[cit. 12. 3. 2010]
- [20] *Katalogový list MMA7260* [online].  
[http://www.freescale.com/files/sensors/doc/data_sheet/MMA7260QT.pdf](http://www.freescale.com/files/sensors/doc/data_sheet/MMA7260QT.pdf)  
df [cit. 12. 3. 2010]
- [21] *Katalogový list ACC7260* [online].  
<http://shop.snailinstruments.com/docs/acc7260.pdf> [cit. 12. 3. 2010]
- [22] *Katalogový list SRF08* [online].  
[http://www.hobbyrobot.cz/PDF/SRF08_cz.pdf](http://www.hobbyrobot.cz/PDF/SRF08_cz.pdf) [cit. 12. 3. 2010]
- [23] *Katalogový list CMPS03* [online].  
[http://www.hobbyrobot.cz/PDF/CMPS03_cz.pdf](http://www.hobbyrobot.cz/PDF/CMPS03_cz.pdf) [cit. 12. 3. 2010]
- [24] *Katalogový list Hokuyo PB9-12* [online].  
<http://www.sentekusa.com/PDFs/PB9-12%28C-42-3077%29.pdf>  
[cit. 12. 3. 2010]

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

IR – infrared

TOF – time of flight

I²C – Internal Integrated Circuit Bus

SPI - Serial Peripheral Interface

USART - Universal Synchronous/Asynchronous Receiver-Transmitter

PWM – Pulse Width Modulation

A/D – analog/digital

ASCII – American Standard Code for Information Interchange

## SEZNAM PŘÍLOH

- |            |                                                                             |
|------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| Příloha 1  | Schéma elektroniky pro zpracování dat                                       |
| Příloha 2  | Deska plošného spoje elektroniky pro zpracování dat                         |
| Příloha 3  | Seznam součástek elektroniky pro zpracování dat                             |
| Příloha 4  | Schéma zapojení modulu kompasu                                              |
| Příloha 5  | Deska plošného spoje modulu kompasu                                         |
| Příloha 6  | Seznam součástek modulu kompasu                                             |
| Příloha 7  | Definované typy zpráv posílaných z PC                                       |
| Příloha 8  | Výkresová dokumentace uchycení sonarů SRF08                                 |
| Příloha 9  | Naměřené vzdálenosti pomocí ultrazvukových dálkoměrů SRF08                  |
| Příloha 10 | Naměřené hodnoty akcelerometru ACC7260 při náklonu                          |
| Příloha 11 | Naměřené hodnoty azimutu kompasu CMPS03 při různém náklonu<br>v ose kompasu |
| Příloha 12 | Disk CD s obsahem                                                           |

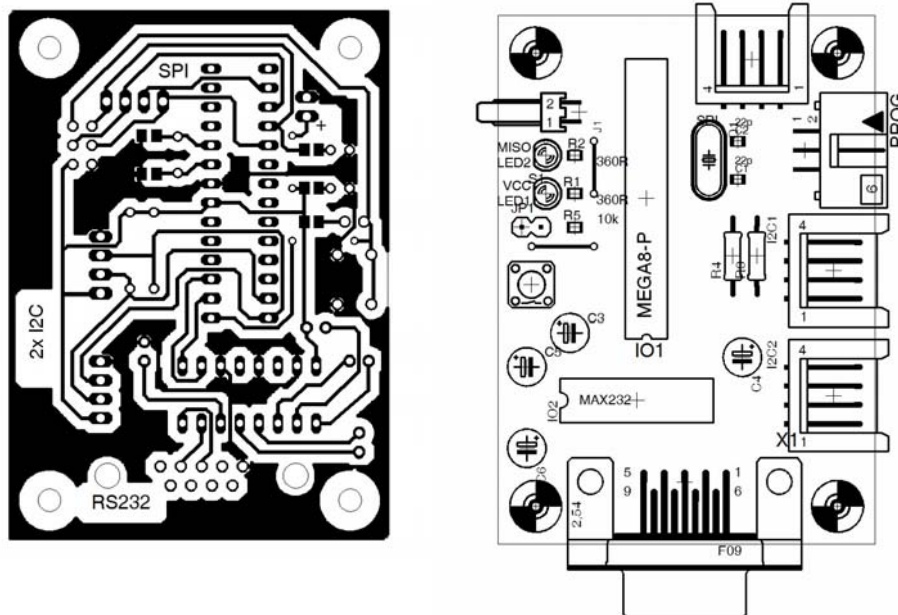
The schematic diagram illustrates the internal components and connections of the MAX232 module. The central component is the MAX232 IC, which is a dual in-line package (DIP) with 14 pins. The pins are labeled as follows:

- Pin 1: TX0
- Pin 2: TX1
- Pin 3: TX2
- Pin 4: TX3
- Pin 5: TX4
- Pin 6: TX5
- Pin 7: TX6
- Pin 8: TX7
- Pin 9: TX8
- Pin 10: TX9
- Pin 11: TX10
- Pin 12: TX11
- Pin 13: TX12
- Pin 14: TX13

The module includes several external components:

- Capacitors:** C1 (100nF), C2 (100nF), C3 (100nF), C4 (100nF), C5 (100nF), C6 (100nF), C7 (100nF), C8 (100nF), C9 (100nF), C10 (100nF), C11 (100nF), C12 (100nF), C13 (100nF), C14 (100nF), C15 (100nF), C16 (100nF), C17 (100nF), C18 (100nF), C19 (100nF), C20 (100nF), C21 (100nF), C22 (100nF), C23 (100nF), C24 (100nF), C25 (100nF), C26 (100nF), C27 (100nF), C28 (100nF), C29 (100nF), C30 (100nF), C31 (100nF), C32 (100nF), C33 (100nF), C34 (100nF), C35 (100nF), C36 (100nF), C37 (100nF), C38 (100nF), C39 (100nF), C40 (100nF), C41 (100nF), C42 (100nF), C43 (100nF), C44 (100nF), C45 (100nF), C46 (100nF), C47 (100nF), C48 (100nF), C49 (100nF), C50 (100nF), C51 (100nF), C52 (100nF), C53 (100nF), C54 (100nF), C55 (100nF), C56 (100nF), C57 (100nF), C58 (100nF), C59 (100nF), C60 (100nF), C61 (100nF), C62 (100nF), C63 (100nF), C64 (100nF), C65 (100nF), C66 (100nF), C67 (100nF), C68 (100nF), C69 (100nF), C70 (100nF), C71 (100nF), C72 (100nF), C73 (100nF), C74 (100nF), C75 (100nF), C76 (100nF), C77 (100nF), C78 (100nF), C79 (100nF), C80 (100nF), C81 (100nF), C82 (100nF), C83 (100nF), C84 (100nF), C85 (100nF), C86 (100nF), C87 (100nF), C88 (100nF), C89 (100nF), C90 (100nF), C91 (100nF), C92 (100nF), C93 (100nF), C94 (100nF), C95 (100nF), C96 (100nF), C97 (100nF), C98 (100nF), C99 (100nF), C100 (100nF).
- Resistors:** R1 (10k), R2 (10k), R3 (10k), R4 (10k), R5 (10k), R6 (10k), R7 (10k), R8 (10k), R9 (10k), R10 (10k), R11 (10k), R12 (10k), R13 (10k), R14 (10k), R15 (10k), R16 (10k), R17 (10k), R18 (10k), R19 (10k), R20 (10k), R21 (10k), R22 (10k), R23 (10k), R24 (10k), R25 (10k), R26 (10k), R27 (10k), R28 (10k), R29 (10k), R30 (10k), R31 (10k), R32 (10k), R33 (10k), R34 (10k), R35 (10k), R36 (10k), R37 (10k), R38 (10k), R39 (10k), R40 (10k), R41 (10k), R42 (10k), R43 (10k), R44 (10k), R45 (10k), R46 (10k), R47 (10k), R48 (10k), R49 (10k), R50 (10k), R51 (10k), R52 (10k), R53 (10k), R54 (10k), R55 (10k), R56 (10k), R57 (10k), R58 (10k), R59 (10k), R60 (10k), R61 (10k), R62 (10k), R63 (10k), R64 (10k), R65 (10k), R66 (10k), R67 (10k), R68 (10k), R69 (10k), R70 (10k), R71 (10k), R72 (10k), R73 (10k), R74 (10k), R75 (10k), R76 (10k), R77 (10k), R78 (10k), R79 (10k), R80 (10k), R81 (10k), R82 (10k), R83 (10k), R84 (10k), R85 (10k), R86 (10k), R87 (10k), R88 (10k), R89 (10k), R90 (10k), R91 (10k), R92 (10k), R93 (10k), R94 (10k), R95 (10k), R96 (10k), R97 (10k), R98 (10k), R99 (10k), R100 (10k).
- Diodes:** D1 (1N4148), D2 (1N4148), D3 (1N4148), D4 (1N4148), D5 (1N4148), D6 (1N4148), D7 (1N4148), D8 (1N4148), D9 (1N4148), D10 (1N4148), D11 (1N4148), D12 (1N4148), D13 (1N4148), D14 (1N4148), D15 (1N4148), D16 (1N4148), D17 (1N4148), D18 (1N4148), D19 (1N4148), D20 (1N4148), D21 (1N4148), D22 (1N4148), D23 (1N4148), D24 (1N4148), D25 (1N4148), D26 (1N4148), D27 (1N4148), D28 (1N4148), D29 (1N4148), D30 (1N4148), D31 (1N4148), D32 (1N4148), D33 (1N4148), D34 (1N4148), D35 (1N4148), D36 (1N4148), D37 (1N4148), D38 (1N4148), D39 (1N4148), D40 (1N4148), D41 (1N4148), D42 (1N4148), D43 (1N4148), D44 (1N4148), D45 (1N4148), D46 (1N4148), D47 (1N4148), D48 (1N4148), D49 (1N4148), D50 (1N4148), D51 (1N4148), D52 (1N4148), D53 (1N4148), D54 (1N4148), D55 (1N4148), D56 (1N4148), D57 (1N4148), D58 (1N4148), D59 (1N4148), D60 (1N4148), D61 (1N4148), D62 (1N4148), D63 (1N4148), D64 (1N4148), D65 (1N4148), D66 (1N4148), D67 (1N4148), D68 (1N4148), D69 (1N4148), D70 (1N4148), D71 (1N4148), D72 (1N4148), D73 (1N4148), D74 (1N4148), D75 (1N4148), D76 (1N4148), D77 (1N4148), D78 (1N4148), D79 (1N4148), D80 (1N4148), D81 (1N4148), D82 (1N4148), D83 (1N4148), D84 (1N4148), D85 (1N4148), D86 (1N4148), D87 (1N4148), D88 (1N4148), D89 (1N4148), D90 (1N4148), D91 (1N4148), D92 (1N4148), D93 (1N4148), D94 (1N4148), D95 (1N4148), D96 (1N4148), D97 (1N4148), D98 (1N4148), D99 (1N4148), D100 (1N4148).
- 5V Regulator:** A 5V regulator is shown at the bottom left, consisting of a 5V input, a 10k resistor, a 100nF capacitor, and a 5V output.
- MAX232 IC:** The MAX232 IC is shown in the center, with its pins connected to the external components.
- Pin Headers:** The module has several pin headers labeled J1-1 through J1-10, J2-1 through J2-10, J3-1 through J3-10, J4-1 through J4-10, J5-1 through J5-10, J6-1 through J6-10, J7-1 through J7-10, J8-1 through J8-10, J9-1 through J9-10, J10-1 through J10-10, J11-1 through J11-10, J12-1 through J12-10, J13-1 through J13-10, J14-1 through J14-10, J15-1 through J15-10, J16-1 through J16-10, J17-1 through J17-10, J18-1 through J18-10, J19-1 through J19-10, J20-1 through J20-10, J21-1 through J21-10, J22-1 through J22-10, J23-1 through J23-10, J24-1 through J24-10, J25-1 through J25-10, J26-1 through J26-10, J27-1 through J27-10, J28-1 through J28-10, J29-1 through J29-10, J30-1 through J30-10, J31-1 through J31-10, J32-1 through J32-10, J33-1 through J33-10, J34-1 through J34-10, J35-1 through J35-10, J36-1 through J36-10, J37-1 through J37-10, J38-1 through J38-10, J39-1 through J39-10, J40-1 through J40-10, J41-1 through J41-10, J42-1 through J42-10, J43-1 through J43-10, J44-1 through J44-10, J45-1 through J45-10, J46-1 through J46-10, J47-1 through J47-10, J48-1 through J48-10, J49-1 through J49-10, J50-1 through J50-10, J51-1 through J51-10, J52-1 through J52-10, J53-1 through J53-10, J54-1 through J54-10, J55-1 through J55-10, J56-1 through J56-10, J57-1 through J57-10, J58-1 through J58-10, J59-1 through J59-10, J60-1 through J60-10, J61-1 through J61-10, J62-

## Příloha 2: Deska plošného spoje elektroniky pro zpracování dat

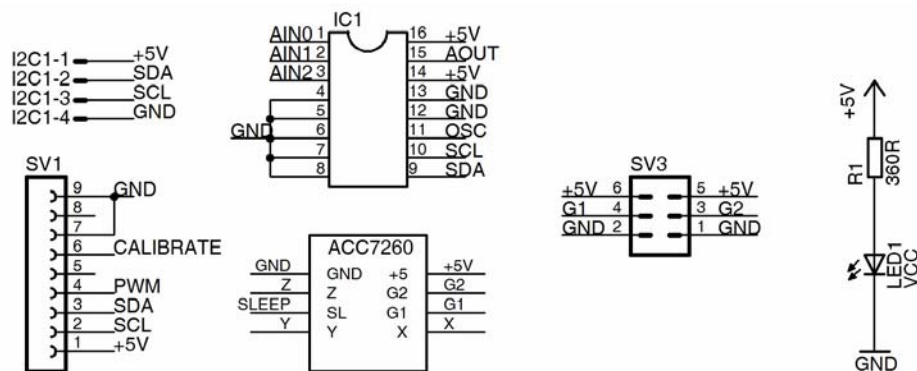


Rozměr desky: 50 x 70 mm

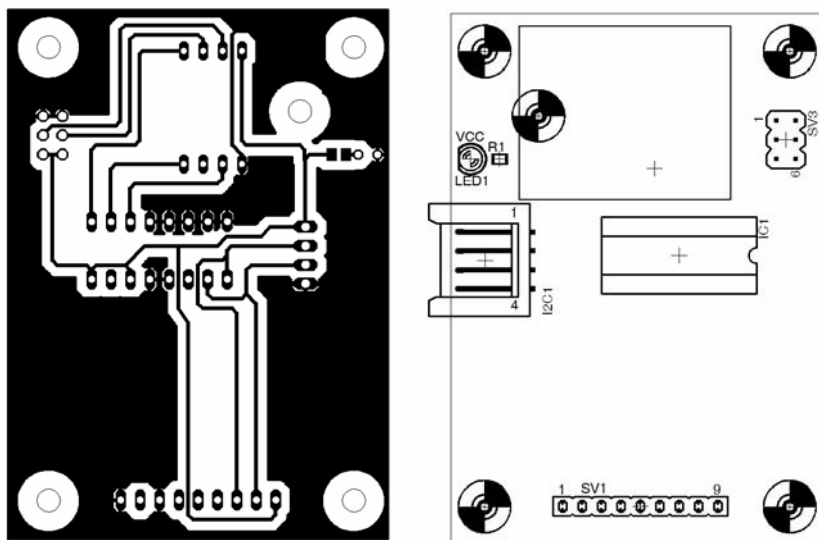
## Příloha 3: Soupis součástek

Označení	Hodnota	Pouzdro
C1, C2	22 p	C0805K
C3 – C6	10M/25V	RM2,5
R1, R2	360	R0805
R3, R4	3k8	R0207
R5	10k	R0805
IO1	MEGA8-P+precizní patice	DIL28
IO2	MAX232+precizní patice	DIL16
PROG		MLW06A
I2C, SPI		PSH02-04WG
S2		P-B1720A
JP2		S2G20W
X1		CAN 9Z90
Q1	16 MHz	HC49/S
LED1,LED2	zelená, žlutá	3 mm

#### Příloha 4: Schéma zapojení modulu kompasu



#### Příloha 5: Deska plošného spoje modulu kompasu



Rozměr desky: 50 x 70 mm

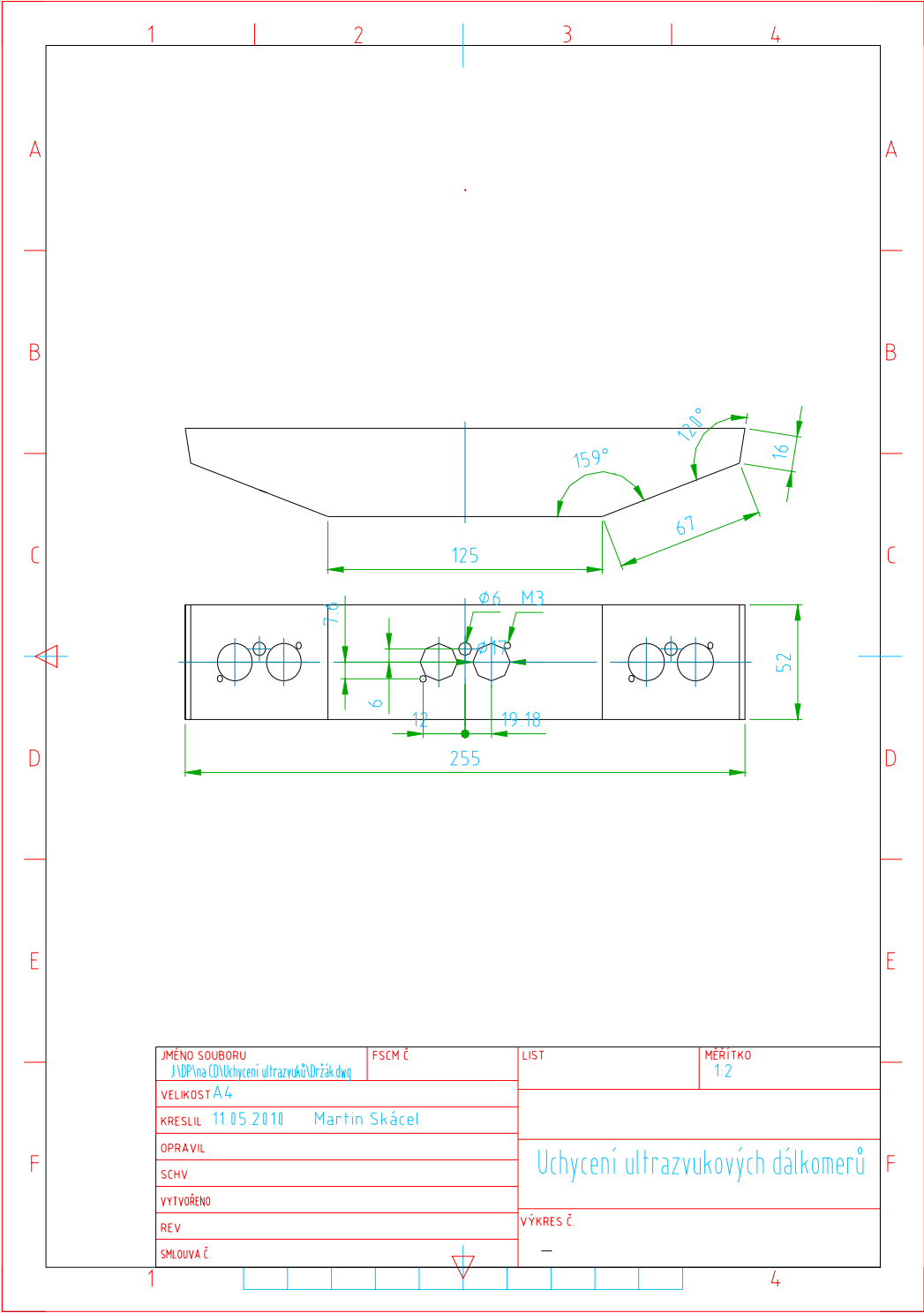
#### Příloha 6: Soupis součástek

Označení	Hodnota	Pouzdro
R1	360	R0805
LED1	červená	3 mm
IC1	PCF8091+precizní patice	DIL16
SV1	1x9 dutinek	PS09-S, RM 2,54
SV2	dvakrát 1x4 dutinek	PS04-S, RM 2,54
SV3	2x3 piny	PLD06-S, RM2,54
I2C1		PSH02-04WG

## **Příloha 7: Definované typy zpráv posílaných z PC**

Typ zprávy	Délka zprávy	Význam
INF	0	Požadavek na zaslání informace o verzi sw
AZI	0	Požadavek na zaslání azimutu
AZ1	0	Požadavek na zaslání složky mag. pole z 1 snimace
AZ2	0	Požadavek na zaslání složky mag. pole z 2 snimace
ACX	0	Požadavek na zaslání zrychlení v ose X
ACY	0	Požadavek na zaslání zrychlení v ose Y
ACZ	0	Požadavek na zaslání zrychlení v ose Z
UZ0	0	Požadavek na zaslání vzdálenosti překážky ze senzoru 0
UZ1	0	Požadavek na zaslání vzdálenosti překážky ze senzoru 1
~~	~~	~~
UZF	0	Požadavek na zaslání vzdálenosti překážky ze senzoru F

Příloha 8: Výkresová dokumentace uchycení sonarů



## Příloha 9: Naměřené vzdálenosti pomocí ultrazvukových dálkoměrů SRF08

Naměřené vzdálenosti ultrazvukovým dálkoměrem SRF08 - U1

X\Y [m]\[m]	-0,70	-0,60	-0,50	-0,40	-0,30	-0,20	-0,10	0,00	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70
0,10	X	X	X	X	X	X	X	0,09	X	X	X	X	X	X	X
0,20	X	X	X	X	X	X	0,24	0,20	0,24	X	X	X	X	X	X
0,30	X	X	X	X	X	X	0,33	0,29	0,33	X	X	X	X	X	X
0,40	X	X	X	X	X	0,50	0,43	0,40	0,43	0,49	X	X	X	X	X
0,50	X	X	X	X	0,61	0,57	0,52	0,50	0,52	0,56	0,60	X	X	X	X
0,60	X	X	X	0,76	0,85	0,64	0,61	0,60	0,61	0,64	0,85	0,75	X	X	X
0,70	X	X	0,94	0,86	0,78	0,73	0,70	0,71	0,70	0,73	0,78	0,85	0,93	X	X
0,80	X	X	0,96	0,89	0,90	0,81	0,81	0,78	0,80	0,80	0,89	0,89	0,95	X	X
0,90	X	1,09	1,06	0,94	0,99	0,91	0,89	0,88	0,89	0,90	0,98	0,94	1,05	1,09	X

Naměřené vzdálenosti ultrazvukovým dálkoměrem SRF08 - U2

X\Y [m]\[m]	-0,70	-0,60	-0,50	-0,40	-0,30	-0,20	-0,10	0,00	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70
0,10	X	X	X	X	X	X	X	X	X	0,14	X	X	X	X	X
0,20	X	X	X	X	X	X	X	X	X	0,26	0,29	X	X	X	X
0,30	X	X	X	X	X	X	X	X	X	0,35	0,38	0,40	X	X	X
0,40	X	X	X	X	X	X	X	X	0,42	0,43	0,47	0,52	0,61	0,66	X
0,50	X	X	X	X	X	X	X	X	0,51	0,53	0,56	0,62	0,68	0,72	0,81
0,60	X	X	X	X	X	X	X	X	0,61	0,62	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85
0,70	X	X	X	X	X	X	X	X	0,71	0,71	0,76	0,80	0,82	0,85	0,92
0,80	X	X	X	X	X	X	X	X	0,81	0,82	0,85	0,82	0,87	0,94	0,99
0,90	X	X	X	X	X	X	X	X	X	0,91	0,93	0,89	0,97	1,01	1,09

**Příloha 10: Naměřené hodnoty akcelerometru ACC7260 při náklonu a výpočet úhlu náklonu pitch a roll**

Náklon [°]	X [V]	Y [V]	Z [V]	ax [g]	ay [g]	az [g]	pitch [°]	roll [°]	$\Delta$ pitch [°]	$\Delta$ roll [°]
-45	1,08	1,04	2,25	-0,75	-0,76	0,68	-36,37	-37,08	8,63	7,92
-40	1,14	1,1	2,29	-0,68	-0,69	0,73	-34,04	-34,76	5,96	5,24
-35	1,19	1,16	2,33	-0,61	-0,61	0,78	-31,80	-31,80	3,20	3,20
-30	1,25	1,22	2,36	-0,54	-0,54	0,81	-28,89	-28,89	1,11	1,11
-25	1,32	1,29	2,39	-0,45	-0,45	0,85	-25,07	-25,07	-0,07	-0,07
-20	1,41	1,38	2,43	-0,34	-0,34	0,90	-19,35	-19,35	0,65	0,65
-15	1,47	1,44	2,47	-0,26	-0,26	0,95	-14,91	-14,91	0,09	0,09
-10	1,55	1,52	2,49	-0,16	-0,16	0,98	-9,34	-9,34	0,66	0,66
-5	1,62	1,59	2,51	-0,08	-0,08	1,00	-4,28	-4,28	0,72	0,72
0	1,68	1,65	2,52	0,00	0,00	1,01	0,00	0,00	0,00	0,00
5	1,74	1,71	2,51	0,08	0,08	1,00	4,28	4,28	-0,72	-0,72
10	1,81	1,78	2,49	0,16	0,16	0,98	9,34	9,34	-0,66	-0,66
15	1,89	1,86	2,47	0,26	0,26	0,95	14,91	14,91	-0,09	-0,09
20	1,95	1,92	2,43	0,34	0,34	0,90	19,35	19,35	-0,65	-0,65
25	2,04	2,01	2,39	0,45	0,45	0,85	25,07	25,07	0,07	0,07
30	2,11	2,08	2,36	0,54	0,54	0,81	28,89	28,89	-1,11	-1,11
35	2,17	2,14	2,33	0,61	0,61	0,78	31,80	31,80	-3,20	-3,20
40	2,22	2,2	2,29	0,68	0,69	0,73	34,04	34,76	-5,96	-5,24
45	2,28	2,26	2,25	0,75	0,76	0,68	36,37	37,08	-8,63	-7,92

**Příloha 11: Naměřené hodnoty azimutu kompasu CMPS03 při různém náklonu v ose kompasu**

Náklon [°]	0						
Azimut [°]	x	y	xn	yn	zn	Azim.1 [°]	Azim.2 [°]
0	256	121	1,00	-0,05	0,06	0	0
10	253	98	0,97	-0,23	0,06	10	10
20	246	77	0,92	-0,40	0,06	20	20
30	235	58	0,83	-0,55	0,06	30	30
40	221	40	0,72	-0,69	0,06	40	40
50	204	25	0,59	-0,80	0,06	50	50
60	185	14	0,44	-0,89	0,06	60	60
70	165	5	0,29	-0,96	0,06	70	70
80	143	1	0,11	-0,99	0,06	80	80
90	121	0	-0,06	-1,00	0,06	90	90
100	98	3	-0,24	-0,98	0,06	100	100
110	77	10	-0,40	-0,92	0,06	110	110
120	58	21	-0,55	-0,84	0,06	120	120
130	40	35	-0,69	-0,73	0,06	130	130
140	25	52	-0,81	-0,59	0,06	140	140
150	14	71	-0,89	-0,45	0,06	150	150
160	5	91	-0,96	-0,29	0,06	160	160
170	1	113	-1,00	-0,12	0,06	170	170
180	1	135	-1,00	0,05	0,06	180	180
190	3	158	-0,98	0,23	0,06	190	190
200	10	179	-0,93	0,40	0,06	200	200
210	21	198	-0,84	0,55	0,06	210	210
220	35	216	-0,73	0,69	0,06	220	220
230	52	231	-0,60	0,80	0,06	230	230
240	71	242	-0,45	0,89	0,06	240	240
250	91	251	-0,29	0,96	0,06	250	250
260	113	255	-0,12	0,99	0,06	260	260
270	135	256	0,05	1,00	0,06	270	270
280	158	253	0,23	0,98	0,06	280	280
290	179	246	0,39	0,92	0,06	290	290
300	198	235	0,54	0,84	0,06	300	300
310	216	221	0,68	0,73	0,06	310	310
320	231	204	0,80	0,59	0,06	320	320
330	242	185	0,89	0,45	0,06	330	330
340	251	165	0,96	0,29	0,06	340	340
350	255	143	0,99	0,12	0,06	350	350

Pozn.: x – údaj vodorovný složky magnetického pole Země ose x robotu

y - údaj vodorovný složky magnetického pole Země v ose y robotu

xn, yn – normalizované hodnoty vodorovných magnetických složek

zn – vypočtená hodnota svislé složky magnetického pole Země

Azim.1 – Údaj azimutu získaný z kompasu CMPS03

Azim.2 – Vypočítaný údaj azimutu s vyvážením kompasu CMPS03

Náklon [°]	2						
Azimut [°]	x	y	xn	yn	zn	Azim.1 [°]	Azim.2 [°]
0	243	121	1,00	-0,05	0,06	0	0
10	240	98	0,97	-0,23	0,06	11	10
20	234	77	0,92	-0,40	0,06	22	20
30	224	58	0,84	-0,55	0,06	33	30
40	212	40	0,74	-0,69	0,06	43	40
50	197	25	0,62	-0,80	0,06	53	50
60	180	14	0,48	-0,89	0,06	62	60
70	161	5	0,32	-0,96	0,06	72	70
80	141	1	0,16	-0,99	0,06	81	80
90	121	0	-0,01	-1,00	0,06	90	90
100	101	3	-0,17	-0,98	0,06	99	100
110	82	10	-0,33	-0,92	0,06	108	110
120	65	21	-0,47	-0,84	0,06	117	120
130	49	35	-0,60	-0,73	0,06	127	130
140	36	52	-0,71	-0,59	0,06	137	140
150	25	71	-0,80	-0,45	0,06	147	150
160	18	91	-0,86	-0,29	0,06	158	160
170	14	113	-0,89	-0,12	0,06	169	170
180	13	135	-0,95	0,05	0,06	180	180
190	16	158	-0,87	0,23	0,06	191	190
200	22	179	-0,82	0,40	0,06	202	200
210	32	198	-0,74	0,55	0,06	213	210
220	44	216	-0,64	0,69	0,06	223	220
230	59	231	-0,52	0,80	0,06	233	230
240	76	242	-0,38	0,89	0,06	242	240
250	95	251	-0,22	0,96	0,06	252	250
260	115	255	-0,06	0,99	0,06	261	260
270	135	256	0,11	1,00	0,06	270	270
280	155	253	0,27	0,98	0,06	279	280
290	174	246	0,43	0,92	0,06	288	290
300	191	235	0,57	0,84	0,06	297	300
310	207	221	0,70	0,73	0,06	307	310
320	220	204	0,81	0,59	0,06	317	320
330	231	185	0,90	0,45	0,06	327	330
340	238	165	0,95	0,29	0,06	338	340
350	242	143	0,99	0,12	0,06	349	350

Pozn.: x – údaj vodorovný složky magnetického pole Země ose x robotu

y - údaj vodorovný složky magnetického pole Země v ose y robotu

xn, yn – normalizované hodnoty vodorovných magnetických složek

zn – vypočtená hodnota svislé složky magnetického pole Země

Azim.1 – Údaj azimutu získaný z kompasu CMPS03

Azim.2 – Vypočítaný údaj azimutu s vyvážením kompasu CMPS03

Náklon [°]	5						
Azimut [°]	x	y	xn	yn	zn	Azim.1 [°]	Azim.2 [°]
0	232	121	1,00	-0,05	0,06	1	0
10	229	98	0,97	-0,23	0,06	13	10
20	223	77	0,92	-0,40	0,06	25	20
30	215	58	0,85	-0,55	0,06	36	30
40	204	40	0,75	-0,69	0,06	46	40
50	190	25	0,63	-0,80	0,06	55	50
60	175	14	0,50	-0,89	0,06	64	60
70	158	5	0,36	-0,96	0,06	73	70
80	140	1	0,20	-0,99	0,06	81	80
90	122	0	0,05	-1,00	0,06	89	90
100	104	3	-0,11	-0,98	0,06	98	100
110	87	10	-0,25	-0,92	0,06	106	110
120	71	21	-0,39	-0,84	0,06	115	120
130	57	35	-0,51	-0,73	0,06	124	130
140	45	52	-0,62	-0,59	0,06	134	140
150	35	71	-0,70	-0,45	0,06	145	150
160	28	91	-0,76	-0,29	0,06	156	160
170	25	113	-0,79	-0,12	0,06	168	170
180	1	135	-1,00	0,05	0,06	181	180
190	27	158	-0,77	0,23	0,06	193	190
200	33	179	-0,72	0,40	0,06	205	200
210	41	198	-0,65	0,55	0,06	216	210
220	52	216	-0,56	0,69	0,06	226	220
230	66	231	-0,44	0,80	0,06	235	230
240	81	242	-0,31	0,89	0,06	244	240
250	98	251	-0,16	0,96	0,06	253	250
260	116	255	0,00	0,99	0,06	261	260
270	134	256	0,15	1,00	0,06	269	270
280	152	253	0,31	0,98	0,06	278	280
290	169	246	0,45	0,92	0,06	286	290
300	185	235	0,59	0,84	0,06	295	300
310	199	221	0,71	0,73	0,06	304	310
320	211	204	0,81	0,59	0,06	314	320
330	221	185	0,90	0,45	0,06	325	330
340	228	165	0,96	0,29	0,06	336	340
350	231	143	0,99	0,12	0,06	348	350

Pozn.: x – údaj vodorovný složky magnetického pole Země ose x robotu

y - údaj vodorovný složky magnetického pole Země v ose y robotu

xn, yn – normalizované hodnoty vodorovných magnetických složek

zn – vypočtená hodnota svislé složky magnetického pole Země

Azim.1 – Údaj azimutu získaný z kompasu CMPS03

Azim.2 – Vypočítaný údaj azimutu s vyvážením kompasu CMPS03

Náklon [°]	10						
Azimut [°]	x	y	xn	yn	zn	Azim.1 [°]	Azim.2 [°]
0	205	121	1,00	-0,05	0,06	2	0
10	203	98	0,98	-0,23	0,06	18	10
20	199	77	0,94	-0,40	0,06	32	20
30	192	58	0,87	-0,55	0,06	44	30
40	184	40	0,79	-0,69	0,06	54	40
50	174	25	0,69	-0,80	0,06	63	50
60	163	14	0,59	-0,89	0,06	70	60
70	150	5	0,46	-0,96	0,06	76	70
80	137	1	0,33	-0,99	0,06	83	80
90	124	0	0,20	-1,00	0,06	89	89
100	110	3	0,07	-0,98	0,06	95	99
110	97	10	-0,06	-0,92	0,06	101	109
120	86	21	-0,17	-0,84	0,06	108	119
130	75	35	-0,27	-0,73	0,06	116	129
140	66	52	-0,36	-0,59	0,06	126	139
150	59	71	-0,43	-0,45	0,06	137	149
160	54	91	-0,48	-0,29	0,06	150	160
170	52	113	-0,50	-0,12	0,06	166	170
180	1	135	-1,00	0,05	0,06	182	180
190	53	158	-0,49	0,23	0,06	198	190
200	57	179	-0,45	0,40	0,06	212	201
210	64	198	-0,38	0,55	0,06	224	211
220	72	216	-0,30	0,69	0,06	234	221
230	82	231	-0,20	0,80	0,06	243	231
240	93	242	-0,10	0,89	0,06	250	241
250	106	251	0,03	0,96	0,06	256	251
260	119	255	0,16	0,99	0,06	263	261
270	132	256	0,28	1,00	0,06	269	271
280	146	253	0,42	0,98	0,06	275	280
290	159	246	0,55	0,92	0,06	281	290
300	170	235	0,65	0,84	0,06	288	300
310	181	221	0,76	0,73	0,06	296	310
320	190	204	0,85	0,59	0,06	306	320
330	197	185	0,92	0,45	0,06	317	330
340	202	165	0,97	0,29	0,06	330	340
350	204	143	0,99	0,12	0,06	346	350

Pozn.: x – údaj vodorovný složky magnetického pole Země ose x robotu

y - údaj vodorovný složky magnetického pole Země v ose y robotu

xn, yn – normalizované hodnoty vodorovných magnetických složek

zn – vypočtená hodnota svislé složky magnetického pole Země

Azim.1 – Údaj azimutu získaný z kompasu CMPS03

Azim.2 – Vypočítaný údaj azimutu s vyvážením kompasu CMPS03

## **Příloha 12: Obsah přiloženého CD**

Na přiloženém CD jsou umístěny tyto soubory a adresáře:

<b>/DP_2010_Skacel_Martin.pdf</b>	tato diplomová práce ve formátu PDF
<b>/Katalogové listy</b>	technická dokumentace použitých komponent
<b>/Literatura</b>	použitá dokumentace pro vyvážení kompasu
<b>/Programy pro mikrokontrolér/</b>	
<b>/Adresa SRF08</b>	zdrojový kód programu pro změnu adresy ultrazvukového senzoru SRF08
<b>/Hlavni program</b>	zdrojový kód program pro řídí jednotku senzorického vybavení
<b>/RobTest</b>	testovací program RobTest pro prostředí MS Windows
<b>/Schémata a desky/</b>	
<b>/Modul kompasu</b>	schéma a deska plošného spoje modulu kompasu
<b>/Řídicí jednotka</b>	schéma a deska plošného spoje řídicí jednotky
<b>/Uchycení ultrazvuků</b>	výkresová dokumentace uchycené ultrazvuků SRF08 ve formátu DWG