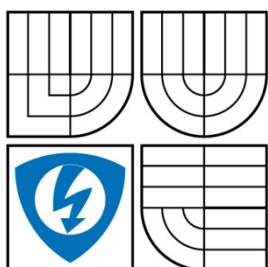


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIOELECTRONICS

SENZOROVÝ SYSTÉM PRO MOBILNÍ ROBOT

MOBILE ROBOT SENSOR SYSTEM

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

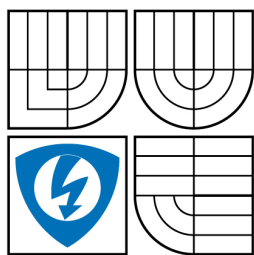
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

MILOŠ JUHÁS

VEDOUČÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. ZBYNĚK FEDRA, Ph.D.

BRNO 2009



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Student: Miloš Juhás

ID: 98171

Ročník: 3

Akademický rok: 2008/2009

NÁZEV TÉMATU:

Senzorový systém pro mobilní robot

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s možnostmi využití různých senzorů pro malý mobilní robot. Zaměřte se na optický senzor pro sledování čáry a doplnění o detekci překážek. Vyberte vhodné senzory a navrhnete obvodové zapojení a diagram pro vyhodnocení údajů procesorem.

Realizujte navržený modul a otestujte jeho vlastnosti. Zhodnoťte jeho parametry (citlivost, přesnost) a možnosti komunikace s řídicí jednotkou. Vytvořte knihovnu funkcí pro řízení daného modulu.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] MATOUŠEK, D. Práce s mikrokontroléry Atmel AVR. BEN - technická literatura, Praha 2003

[2] NOVÁK, P. MOBILNÍ ROBOTY - pohony, senzory, řízení. BEN - technická literatura, Praha 2005

Termín zadání: 9.2.2009

Termín odevzdání: 5.6.2009

Vedoucí práce: Ing. Zbyněk Fedra, Ph.D.

prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

Abstrakt

V bakalárskej práci sú spracované základné teoretické poznatky potrebné pri návrhu senzorového systému pre malého mobilného robota a navrhnutý vlastný senzorový systém. Práca popisuje princíp činnosti taktilných, optoelektronických ako aj ultrazvukových senzorov, ich základné vlastnosti, výhody a nevýhody. Následne sú spracované známe možnosti zapojenia senzorov na sledovanie čiary a detekciu prekážky a stručne popísané komerčne dostupné riešenia. V druhej časti je na základe uvedených princípov, experimentálnych zapojení a meraní navrhnutý vlastný senzorový systém s pokročilými metódami detekcie a spracovania údajov mikroprocesorom. Návrh je zameraný na optimalizáciu spotreby, efektívnosť obslužného softwaru a značnú univerzálnosť systému. Súčasťou práce sú tiež knižnice funkcií potrebné pre jednoduché ovládanie a implementáciu senzorového subsystému do vlastnej aplikácie. Na záver sú uvedené a zhodnotené výsledky testovania a zmerané parametre navrhnutého systému.

Kľúčové slová

Senzorový systém, optické senzory, ultrazvukové senzory, sledovanie čiary, detekcia prekážky, mobilný robot

Abstract

In this Bachelor's thesis is processed the basic theoretical knowledge needed to design sensory system for a small mobile robot and the sensory system itself is designed. Thesis describes the working principle of tactile, optoelectronic and ultrasound sensors, their basic features, advantages and disadvantages. Next there are processed known prospects of sensors electrical schemes for line following and obstacle detection sensors and commercially available solutions are briefly described. In the second part there is, based on introduced principles, experimental schemes and measurements, the sensory system itself designed, which is capable of advanced detection abilities and microprocessor conducted data processing. The design is focused on power usage optimisation, control software efficiency and extended universality of designed system. Part of the thesis is library of functions required for simple control and sensory system application. In the epilogue there are listed and evaluated the testing results and measured parameters of designed system.

Keywords

Sensor system, optical sensors, ultrasonic sensors, line follower, obstacle detection, mobile robot

JUHÁS, M. *Senzorový systém pro mobilní robot*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 51 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Zbyněk Fedra, Ph.D.

Prohlášení

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

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

V Brně dne 5. června 2009

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Zbyňkovi Fedrovi, PhD. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne 5. června 2009

.....
podpis autora

Obsah

Obsah	6
Zoznam obrázkov.....	7
Zoznam tabuliek.....	8
Úvod.....	9
1 Základné optoelektronické prvky.....	10
1.1 Fotoemitory	10
1.2 Fotodetektory	11
2 Detekcia čiary	12
2.1 Princíp detekcie.....	12
2.2 Možnosti zapojenia senzorov	12
2.3 Porovnanie jednotlivých typov senzorov	14
3 Detekcia prekážky.....	16
3.1 Taktilné senzory	16
3.2 Optoelektronické senzory.....	17
3.3 Ultrazvukové senzory.....	21
3.4 Komerčné senzory.....	23
4 Návrh obvodového zapojenia.....	26
4.1 Sledovanie čiary	26
4.2 Detekcia prekážky.....	27
4.3 Sensorový subsystém ako celok.....	29
5 Spracovanie údajov	30
5.1 Zbrnica I2C	30
5.2 Komunikačný protokol.....	31
5.3 Vyhodnotenie zmeraných údajov.....	33
6 Dosiahnuté parametre.....	34
6.1 Doba merania	34
6.2 Spoľahlivosť.....	35
6.3 Energetická náročnosť.....	36
7 Záver	37
Zoznam použitej literatúry	39
Zoznam použitých skratiek	40
Zoznam príloh	41

Zoznam obrázkov

Obrázok 1.1: Spektrum laserovej diódy (červenou) a LED diódy (modrou)	10
Obrázok 1.2: a) fotodióda v hradlovom režime, b) fotodióda v odporovom režime	11
Obrázok 1.3: Fotodetektor s fototranzistorom bez vyvedenej bázy	11
Obrázok 2.1: Princíp detekcie čiary	12
Obrázok 2.2: Bloková schéma senzora s A/D prevodníkom	13
Obrázok 2.3: Sledovanie čiary pomocou CCD snímača. Prevzaté z (5)	14
Obrázok 3.1: Pripojenie taktilných senzorov k mikroprocesoru	16
Obrázok 3.2: Princíp detekcie prekážky optoelektronickým sensorom	17
Obrázok 3.3: Bloková schéma obvodu SFH5110. Prevzaté z (7)	17
Obrázok 3.4: Citlivosť obvodu SFH5110 na vlnovej dĺžke svetla. Prevzaté z (7)	18
Obrázok 3.5: Jednoduchý senzor na detekciu prekážok	18
Obrázok 3.6: Modulácia a demodulácia dát pomocou SFH5110. Prevzaté z (7)	19
Obrázok 3.7: Princíp detekcie polohy prekážky s dvomi IR LED	19
Obrázok 3.8: Zmena intenzity vyžarovaného signálu	20
Obrázok 3.9: Príklad zapojenia ultrazvukového detektora prekážok	22
Obrázok 3.10: Vyžarovací diagram meničov UST40	22
Obrázok 3.11: Meranie vzdialenosti pomocou triangulácie	23
Obrázok 3.12: Nelineárny výstup senzoru GP2D120	24
Obrázok 3.13: a) IR senzor GP2D120, ultrazvukové merače b) SRF02, c) SRF08	25
Obrázok 4.1: Ideálne umiestnenie senzorov na trojkolesový podvozok	26
Obrázok 4.2: Pripojenie senzorov na sledovanie čiary k mikroprocesoru	27
Obrázok 4.3: Rozmiestnenie senzorov na detekciu prekážky	27
Obrázok 4.4: Pripojenie senzora na detekciu prekážky k mikroprocesoru	28
Obrázok 4.5: Bloková schéma navrhnutého modulu	29
Obrázok 5.1: Začiatie a ukončenie vysielania na zbernici I2C. Prevzaté z (10)	30
Obrázok 5.2: Zápis riadiaceho bytu a čítanie údajov zo senzorov	31
Obrázok 5.3: Štruktúra bytu s príkazom	31
Obrázok 5.4 Zjednodušený vývojový diagram	32
Obrázok 5.5: Formát údajov v režime s určením smeru jazdy	33
Obrázok 5.6: Formát odosielaných údajov - detekcia prekážky	33
Obrázok 6.1: Závislosť výstupného napätia na type a vzdialenosti povrchu	35

Zoznam tabuliek

Tabuľka 2.1: Výhody a nevýhody jednotlivých typov senzorov	14
Tabuľka 3.1: Optické senzory firmy Sharp	24
Tabuľka 6.1: Doby trvania sledovaných procesov	34
Tabuľka 6.2: Celkový odber prúdu pri rôznych procesoch	36

Úvod

S rýchlým rozvojom elektroniky a počítačov sa stáva stále populárnejšia aj robotika. Každoročne sa po celom svete usporadúva množstvo súťaží pre deti, študentov i dospelých, ktorých cieľom je zostrojiť malého autonómneho robota schopného čo najlepšie splniť danú úlohu. Sensorický systém má pre takéhoto robota rovnako veľký význam ako základné zmysly pre človeka. Umožňuje mu vidieť, počuť dokonca aj cítiť.

Existuje viacero možností ako rozdeliť senzory, ktoré robot využíva. Podľa toho, či dané senzory vyhodnocujú parametre robota ako sú rýchlosť, kapacita batérie či teplota alebo sprostredkujú kontakt s okolím napr. kompas, GPS, kamera, detektory prekážok, môžeme hovoriť o interných alebo externých senzorochoch. Tiež je možné deliť senzory na pasívne alebo aktívne. Pasívne senzory využívajú iba parametre prostredia a detegujú napr. žiarenie. Aktívne senzory k meraniu potrebných veličín okrem detektorov používajú aj emitory rôznych druhov žiarenia (viditeľné, infračervené, mikrovlnné, rádiové) a zasahujú tak do prostredia, v ktorom pracujú.

Cieľom tejto práce je návrh sensorového systému, ktorý umožní malému mobilnému robotovi sledovať čiaru a zároveň sa vyhnúť prípadným prekážkam na trati. Najskôr sa zameriame na niekoľko typov optických senzorov a povieme si akým spôsobom je možné rozpoznať čiaru od podložky. Následne prejdeme na možnosti detekcie prekážky. Zoznámime sa s taktílnymi (dotykovými), optickými a ultrazvukovými senzormi. Vysvetlíme si ich vlastnosti, výhody aj nevýhody, uvedieme možnosti ich využitia a rôzne metódy detekcie. Predstavíme si aj niektoré komerčne dostupné senzory využívané v mobilných robotoch a navrhne komplexné obvodo­vé zapojenie sensorového subsystému pre mobilného robota. Systém bol navrhnutý tak, aby ho bolo možné použiť pre ľubovoľný typ podvozku, no jeho primárne určenie v tejto práci je trojkolesový podvozok s diferenciálnym riadením. S riadiacou jednotkou komunikuje pomocou dvojvodičovej zbernici TWI a na jeho ovládanie bola navrhnutá celá rada príkazov a nastavení. Pre jednoduchú implementáciu je tiež napísaná knižnica funkcií, ktorá umožňuje komplexné využitie prostriedkov sensorového subsystému. Vlastnosti tohto systému sú overené množstvom testov a meraní, ktoré boli robené v priebehu návrhu na jednotlivých komponentoch ako aj po dokončení a zostavení systému.

Robot, ktorý bude využívať tento sensorový systém má za úlohu sledovať čiaru na kontrastnom podklade (zvyčajne čierna čiara na bielej podložke). Na trase sa môžu nachádzať rôzne typy prekážok alebo nástrah, s ktorými sa musí vyrovnáť a prejsť celý okruh za čo najkratší čas. Dôležité parametre takéhoto robota sú teda predovšetkým typ podvozku a pohonná jednotka, kvalitné a vhodne rozmiestnené senzory, no a samozrejme vhodný algoritmus na spracovanie získaných údajov.

1 Základné optoelektronické prvky

1.1 Fotoemitory

Sú to súčiastky schopné generovať svetlo, tj. elektromagnetické žiarenie od ultrafialového, cez viditeľné až po infračervené spektrum. V senzoroch sa môžeme najčastejšie stretnúť s LED diódou a laserovou diódou.

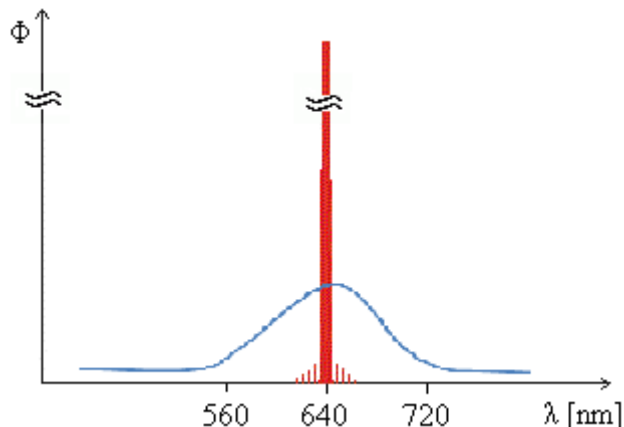
1.1.1 LED diódy

Luminiscenčná dióda LED (Light emitting diode = Svetlo emitujúca dióda) je polovodičová súčiastka s jedným PN prechodom. Ak PN prechodom prechádza prúd v priepustnom smere, dochádza k priamej rekombinácii páru elektrón-diera a emituje sa svetlo. Spektrum LED diódy je úzke a vykazuje gaussovo rozloženie. Vlnová dĺžka a teda farba je závislá na použítom polovodičovom materiáli. Vyrábajú sa LED diódy vyžarujúce svetlo rôznej farby od ultrafialového až po infračervené, no vzhľadom na jeho úzke spektrum, nie je možné priamo vyrobiť bielu LED. Malé rozmery, rýchlosť spínania, vysoká odolnosť a dlhá životnosť robí z LED diódy významný prvok pre optoelektronické senzory. Vhodným tvarom puzdra je možné svetlo smerovať na potrebné miesto a farba svetla nie je závislá od veľkosti pretekajúceho prúdu. Pre nás bude mať najväčší význam infračervená dióda. Tá emituje elektromagnetické žiarenie vlnovej dĺžky nad 680nm, na ktoré už ľudské oko nie je citlivé.

1.1.2 Laserová dióda

Laserová dióda je polovodičová súčiastka s jedným PN prechodom. Pokiaľ ňou prechádza veľmi malý prúd, vzniká spontánna emisia podobne ako pri klasických LED diódach. Ak prúd tečúci PN prechodom prekročí určitú kritickú hodnotu, začne sa uplatňovať zosilňovací jav a nastáva stimulovaná emisia. Najviac sú za pomoci optického rezonátora zosilňované vlnové dĺžky v okolí maximálnej intenzity vyžarovaného spektra. Porovnanie spektra laserovej diódy a LED diódy je znázornené nižšie (Obrázok 1.1).

Malý rozptyl, úzka šírka pásma a vysoký vyžarovací výkon umožňujú využitie laserových diód v mnohých aplikáciách, pre nás sú zaujímavé predovšetkým z hľadiska detekcie predmetov a merania vzdialenosti k prekážkam. Lit. (1), (2)



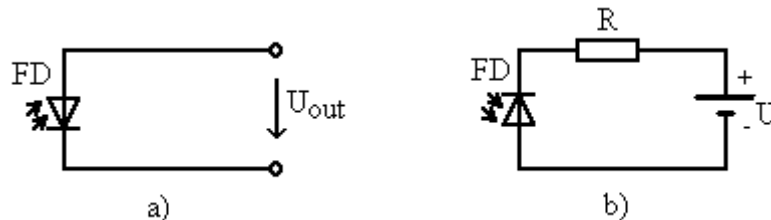
Obrázok 1.1: Spektrum laserovej diódy (červenou) a LED diódy (modrou)

1.2 Fotodetektory

Fotodetektory sú polovodičové súčiastky premieňajúce svetlo na inú merateľnú veličinu. Existuje viacero druhov fotodetektorov. Bližšie sa pozrieme na dva z nich.

1.2.1 Fotodióda

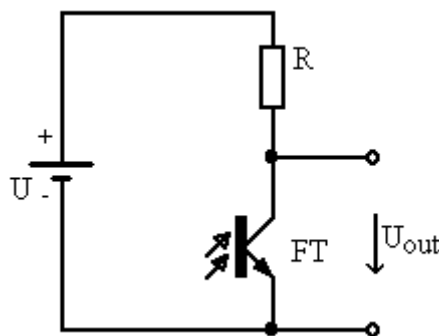
Fotodióda je vlastne polovodičová dióda, na ktorej PN prechod môže dopadať svetlo. Pracuje v dvoch režimoch. Prvým z nich je hradlový režim (Obrázok 1.2a), kedy funguje ako zdroj elektrickej energie. Druhým režimom je odporový režim (Obrázok 1.2b). V tomto prípade je na fotodiódu privedené záverné elektrické napätie a tá mení svoj odpor v závislosti na intenzite dopadajúceho elektromagnetického žiarenia. Najvyššia citlivosť je dosahovaná v oblasti infračerveného žiarenia. S fotodiódami pre viditeľné spektrum sa stretne len ojedinele, keďže tu majú lepšiu citlivosť fototranzistory. Výhodou fotodiódy je jej vysoká rýchlosť, tá môže byť v porovnaní s fototranzistorom aj 20 násobne vyššia. Lit. (2), (3)



Obrázok 1.2: a) fotodióda v hradlovom režime, b) fotodióda v odporovom režime

1.2.2 Fototranzistor

Využíva fotoelektrický jav, avšak je konštruovaný ako bežný tranzistor so zosilňovacím účinkom. Svetlo dopadá na bázu, ktorá nemusí byť pripojená na zdroj elektrickej energie (Obrázok 1.3). V prípade, že má fototranzistor vyvedenú bázu, môžeme ju využiť na reguláciu citlivosti. Nevýhodou fototranzistora oproti fotodióde je nižšia rýchlosť a vyšší šum. Rýchlosť je možné podstatne zvýšiť použitím poľom riadeného tranzistora. Lit. (2)



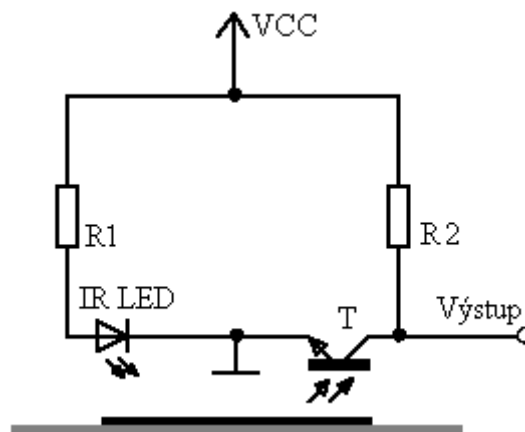
Obrázok 1.3: Fotodetektor s fototranzistorom bez vyvedenej bázy

2 Detekcia čiary

Cieľom práce je navrhnuť senzorový systém vhodný na sledovanie čiary. Zvyčajne sa používa čierna čiara na bielom podklade. To detekciu do značnej miery zjednodušuje. V tejto kapitole sú spracované potrebné teoretické základy.

2.1 Princíp detekcie

V predchádzajúcej kapitole sme sa stručne zoznámili s LED diódou a fototranzistorom. Tieto dva prvky budú pri detekcii čiary kľúčové. Základom pre rozpoznanie čiary je ožiarenie povrchu svetlom z LED diódy. Odrazené svetlo bude dopadať na fotodetektor a ten ho premení na elektrickú veličinu, ktorú už môžeme jednoducho zmerať a vyjadriť číslom. V skutočnosti nás nebude zaujímať farba povrchu ale kontrast medzi podložkou a čiarou. Najjednoduchším senzorom teda bude pár fotoemitor, fotodetektor (Obrázok 2.1). Výstupom pre nás bude 0 alebo 1, ktoré symbolizujú čiaru a podložku. Keďže výstup fotodetektora je analógový, musíme jeho úroveň vhodne prispôbiť logike riadiacej jednotky. Pre logické obvody TTL s napájacím napätím 5 V nesmie úroveň napätia logickej 0 presiahnuť 0,8 V a logickej 1 klesnúť pod 1,8 V. Napríklad pre mikroprocesor ATmega16 spoločnosti ATMEL je nízka logická úroveň definovaná ako maximálne $0,2 \cdot V_{CC}$ (1 V pri $V_{CC} = 5$ V) a pre vysokú úroveň nesmie napätie klesnúť pod $0,6 \cdot V_{CC}$ (3 V pri $V_{CC} = 5$ V). Svetlo emitované LED diódou sa od každého typu povrchu odráža inak a preto nestačí skalibrovať senzory len pri ich konštrukcii ale je potrebné ich nastaviť pre každú trať osobitne. Lit. (4)



Obrázok 2.1: Princíp detekcie čiary

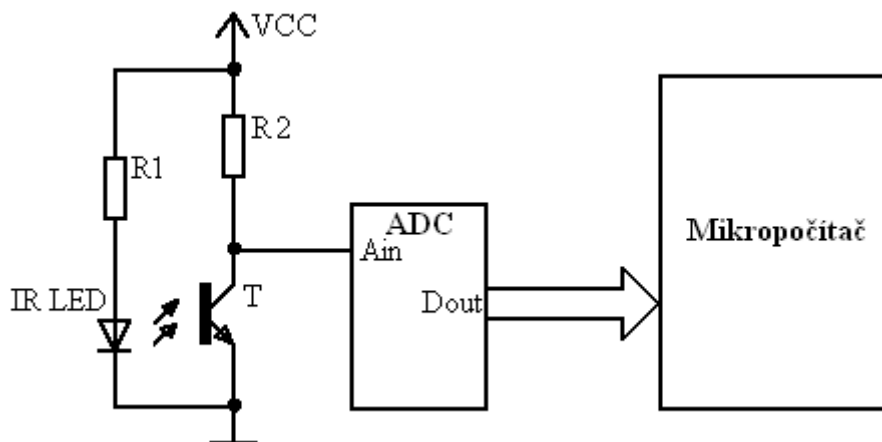
2.2 Možnosti zapojenia senzorov

Jednoduchý senzor aký sme si predstavili (Obrázok 2.1) môže byť v známom prostredí veľmi rýchly a efektívny. Problém ale nastáva ak sa počas nasadenia robota zmenia parametre trate alebo prostredia. Mikroprocesor, ku ktorému je senzor pripojený rozhoduje na základe úrovne napätia na fototranzistore. Kalibráciu vykonanú pred spustením robota na trať už počas jazdy nie je možné ovplyvniť. Veľké komplikácie preto môže spôsobiť napríklad obyčajná žiarovka, ktorej spektrum obsahuje aj infračervené zložky. Toto je možné vyriešiť dvoma spôsobmi. Prvý je umiestnene

senzorov čo najbližšie k povrchu trate a zabrániť tak prenikaniu okolitého osvetlenia k fototranzistora. Druhou možnosťou je použitie komparátora alebo A/D prevodníka.

Pomocou analógového komparátora môžeme porovnávať výstupné napätie senzoru s referenčnou hodnotou napätia danou okolitým osvetlením. V prípade bieleho podkladu sa od povrchu bude odrážať svetlo vyžarované IR diódou a dopadať na bázu fototranzistora. Ten sa otvorí a na jeho kolektore bude napätie blízke 0 V. Ak ale bude IR dióda ožarovať čierny povrch, bude sa od neho odrážať minimálne množstvo svetla. Na výstupe senzoru by teda malo byť napájacie napätie. Okolité osvetlenie však spôsobí, že miesto vysokej úrovne bude napätie na výstupe fototranzistoru dané množstvom rušivého svetelného žiarenia. Pokiaľ teda na vstupe komparátora bude hodnota nižšia ako so senzoru okolitého osvetlenia, na výstupe komparátora bude logická 0. V opačnom prípade sa komparátor preklolí a na jeho výstupe sa objaví logická 1.

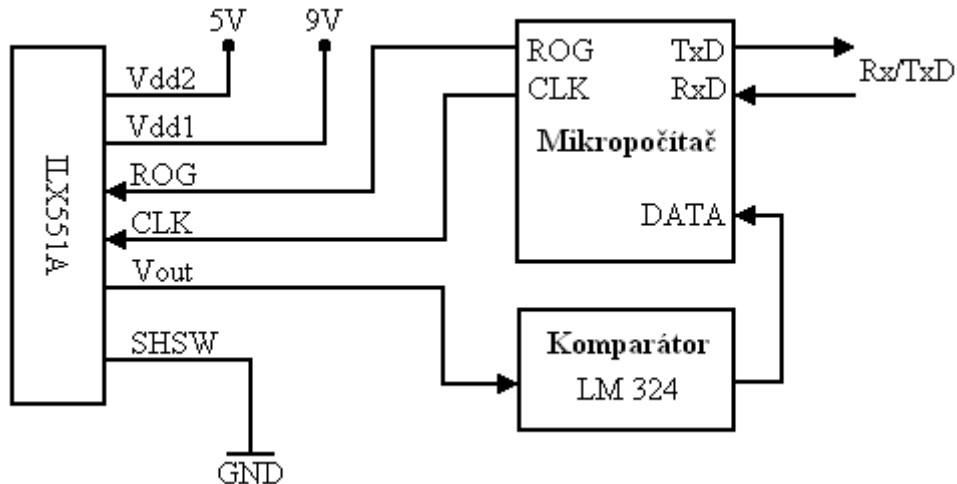
Podobné riešenie je možné realizovať pomocou A/D prevodníka, ktorého výstupom bude binárne vyjadrená hodnota napätia na senzorech. Bloková schéma takéhoto senzora je uvedená na obrázku nižšie (Obrázok 2.2) Skutočnosť, že kalibráciu je možné uskutočniť softwarovo, ďalej rozširuje funkčnosť senzorov. Tie budú schopné detegovať aj čiaru inej ako čiernej farby resp. čiaru s inými odrazovými vlastnosťami a to bez nutnosti zdĺhavého nastavovania vhodných logických úrovní kolektorovým odporom pred každou jazdou. Prevodník môže byť súčasťou mikroprocesora alebo ako externý obvod. Ten s mikroprocesorom komunikuje pomocou sériovej zbernice, prípadne sa môže pripájať paralelne. Príkladom vhodného A/D prevodníka k senzorum na sledovanie čiary je obvod PCF8591. Obsahuje 4 analógové vstupy pre 8bitový A/D prevodník a jeden analógový výstup (DA prevodník). S riadiacou jednotkou komunikuje pomocou dvojvodičovej zbernice I2C.



Obrázok 2.2: Bloková schéma senzora s A/D prevodníkom

Popisované senzory na detekciu čiary založené na IR LED a fototranzistore však nie sú jedinou možnosťou. Čiara sa dá veľmi presne sledovať pomocou CCD snímača. Pre ilustráciu si uvedieme blokovú schému s CCD snímačom firmy Sony, ILX551A (Obrázok 2.3). Senzor má 2087 pixelov usporiadaných v jednom rade, z čoho prvých 13 je nedefinovaných, ďalších 18 sa javí, že zaznamenávajú čiernu farbu, nasleduje 2048 efektívnych pixelov a potom 6 nedefinovaných. Aby meranie prebiehalo korektné, je dôležité presné generovanie signálu CLK v rozsahu 50 kHz až 5 MHz. Meranie sa začne nastavením signálu ROG na logickú 0 po dobu 1 μ s. To nám zabezpečí nastavenie na prvý pixel a prechod na ďalší pixel je realizovaný signálom CLK. Pomocou signálu SHSW sa vyberá režim snímania. Pokiaľ je tento pin pripojený na logickú 0, senzor pracuje v režime S/H (Sample and Hold). V tomto prípade je počas

celej doby trvania impulzu CLK výstupné napätie V_{OUT} konštantné a úmerné veľkosti osvetlenia aktuálneho pixelu. V druhom režime (vývod SHSW pripojený na logickú 1) je S/H vypnuté a signál V_{OUT} je rozdelený na dve časti. Začína na úrovni zakrytého pixelu a v druhej časti klesne na skutočnú úroveň podobne ako v predchádzajúcom režime. Ako už bolo naznačené vyššie, signál V_{OUT} je analógový výstup CCD snímača. Ten je možné spracovať napr. pomocou A/D prevodníku alebo analógového komparátora. Lit. (5)



Obrázok 2.3: Sledovanie čiary pomocou CCD snímača. Prevzaté z (5)

2.3 Porovnanie jednotlivých typov senzorov

Aby sme mohli vybrať vhodné senzory, potrebujeme poznať výhody a nevýhody jednotlivých typov. Preto si teraz zhrnieme ich najdôležitejšie vlastnosti (Tabuľka 2.1).

Tabuľka 2.1: Výhody a nevýhody jednotlivých typov senzorov

Senzor	Fototranzistor, fotodióda (Obrázok 2.1)	Fototranzistor, fotodióda, A/D prevodník (Obrázok 2.2)	CCD snímač (Obrázok 2.3)
Rýchlosť	Najvyššia	Stredná, daná rýchlosťou A/D prevodu	Najnižšia, daná rýchlosťou A/D prevodu, počtom spracovávaných údajov
Presnosť	Závisí na počte senzorov	Závisí na počte senzorov	Vysoká, v závislosti na rozlíšení CCD
Spoľahlivosť	Je zaručená len v známom prostredí za konštantných svetelných podmienok	Vysoká, daná A/D prevodníkom prípadne senzorom rušivého IR žiarenia	Vysoká, daná A/D prevodníkom, resp. komparátorom
Cena	Najnižšia, Jednotky až desiatky Kč	Stredná, desiatky Kč	Najvyššia, cena snímača a optiky stovky až tisíce Kč

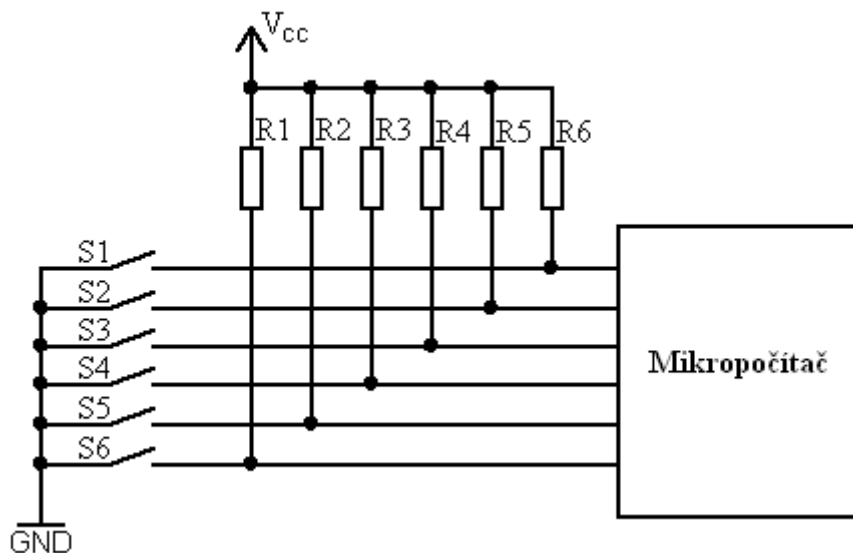
Najvyššiu presnosť je možné dosiahnuť pomocou senzorov s CCD snímačom. Tá je daná vysokým rozlíšením, ktoré senzor dosahuje. Je teda možné zaznamenať aj najmenšiu odchýlku od sledovanej čiary. Výstup senzora je nutné spracovať A/D prevodníkom alebo komparátorom aby bola rozlíšená čiara od podložky. Od kvality A/D prevodníka, prípadne správne nastaveného referenčného napätia komparátora je závislá spoľahlivosť detekcie. Tieto prvky umožňujú korektne rozlíšiť podložku od čiary aj v prípade rušivého osvetlenia. Na druhej strane je tu rýchlosť senzorov, ktorá je znižovaná prevodom analógového výstupného napätia na digitálne. Ďalšie spomalenie môže nastať v prípade použitia externého A/D prevodníka, ktorý komunikuje po sériovej zbernici. Preto je nutné zvážiť tieto parametre a zvoliť rozumný kompromis podľa toho aké vlastnosti sú pre daného robota prioritné.

3 Detekcia prekážky

3.1 Taktilné senzory

Jedná sa o najjednoduchšiu formu detekcie prekážky, založenej na priamom fyzickom kontakte. Ako senzor je možné použiť napr. mikrospínač alebo akékoľvek iné tlačidlo. Spracovanie signálu z taktilného senzora riadiacou jednotkou je jednoduché, pretože výstupom je logická 0 alebo logická 1 (Obrázok 3.1). Keďže sa ale jedná o mechanický spínač, je potrebné ošetriť zákmity či už softwarovo alebo hardwarovo.

Tento typ senzorov je v našom prípade na detekciu prekážky nevyhovujúci, pretože ak má robot naplánovať trasu po ktorej prekážku plynule obíde, potrebuje o jej prítomnosti vedieť s dostatočným predstihom. Na tieto účely budú vhodnejšie optické alebo ultrazvukové senzory. Taktilné senzory môžu byť použité vo forme nárazníku na detekciu kolízie, prípadne na detekciu povrchu aby robot nespadol z podložky na zem. Tu je potrebné použiť mikrospínač s malým mechanickým odporom aby nedochádzalo k nadľahčovaniu podvozku.

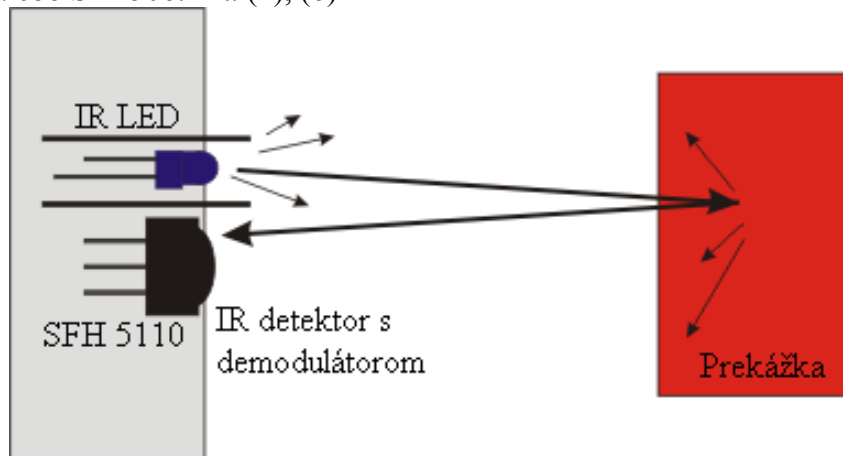


Obrázok 3.1: Pripojenie taktilných senzorov k mikroprocesoru

3.2 Optoelektronické senzory

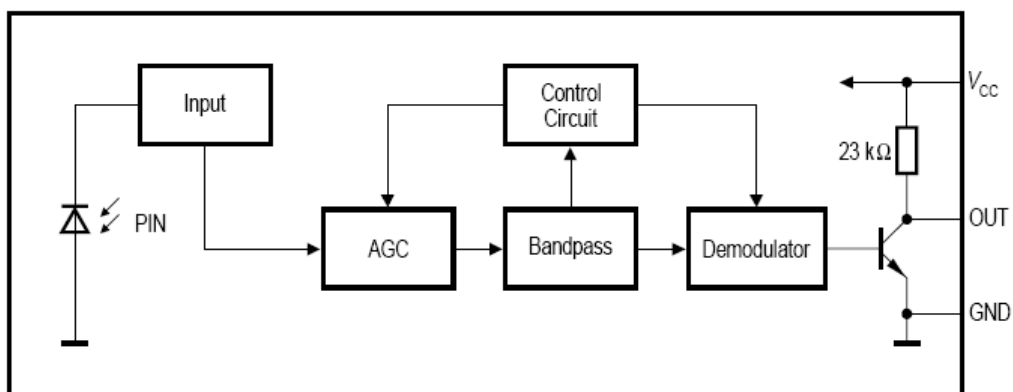
3.2.1 Princíp detekcie

Optoelektronický detektor prekážok je určený na detekciu prekážky v blízkosti robota. Senzor pozostáva z LED diódy a fototranzistora prípadne fotodiódy. Kvôli menšiemu rušeniu a nižšej citlivosti na farbu povrchu sa používajú infračervené diódy a fototranzistor citlivý len na úzke spektrum infračerveného svetla. Malé množstvo IR žiarenia emitovaného LED diódou sa od prekážky odrazí späť smerom k senzorum a dopadá na bázu fototranzistora (Obrázok 3.2). Výstupom sensorov nie je presná vzdialenosť, ale iba informácia o tom, či sa na trati nachádza prekážka alebo nie. Fotodetektor je vystavený okolitému osvetleniu, ktoré zahŕňa aj infračervené žiarenie pracovnej vlnovej dĺžky fototranzistora a preto sa v praxi využíva fototranzistor s demodulátorom. Svetlo vyžarované LED diódou je pomocou mikroprocesora alebo ďalšieho hardwaru modulované na nosnú frekvenciu. Najčastejšie sa používajú frekvencie 36, 38 alebo 40 kHz, pre ktoré sú ľahko dostupné prijímače napríklad SFH5110 alebo SFH506. Lit. (2), (6)



Obrázok 3.2: Princíp detekcie prekážky optoelektronickým senzorum

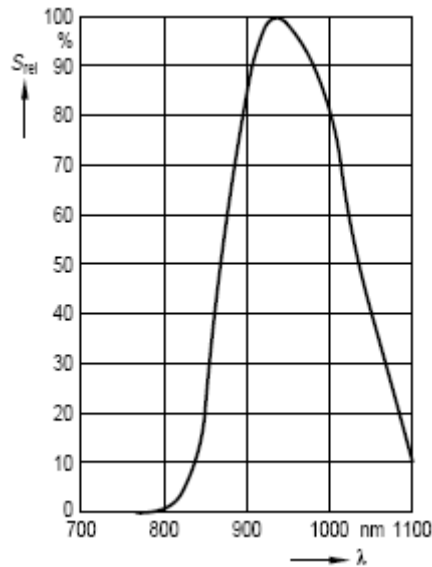
3.2.2 SFH5110



Obrázok 3.3: Bloková schéma obvodu SFH5110. Prevzaté z (7)

Obvod SFH5110 je prijímač s integrovaným demodulátorom podľa verzie od 33 do 40 kHz. Ako ukazuje bloková schéma (Obrázok 3.3), v jednom puzdre obsahuje fotodiódu, predzosilňovač, obvod pre automatické nastavenie zosilnenia a demodulátor.

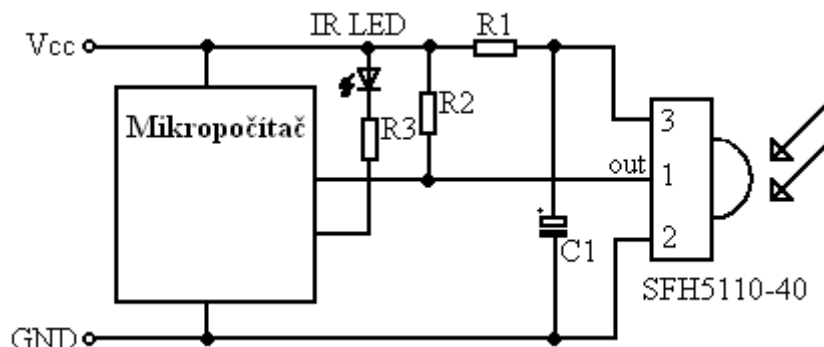
Navyše je vybavený filtrom denného svetla, ktorý potláča viditeľnú časť spektra a robí tak prijímač najcitlivejším na vlnových dĺžkach v okolí $\lambda=950$ nm (Obrázok 3.4). Výstup obvodu je logický a kompatibilný s technológiou TTL a CMOS, čo dovoľuje priame pripojenie k mikroprocesoru. Všetky tieto vlastnosti nám umožňujú zostaviť pomocou neho kvalitný detektor prekážok pre mobilného robota a to s minimálnym množstvom súčiastok. Lit. (7)



Obrázok 3.4: Citlivosť obvodu SFH5110 na vlnovej dĺžke svetla. Prevzaté z (7)

3.2.3 Zapojenie optoelektronických senzorov

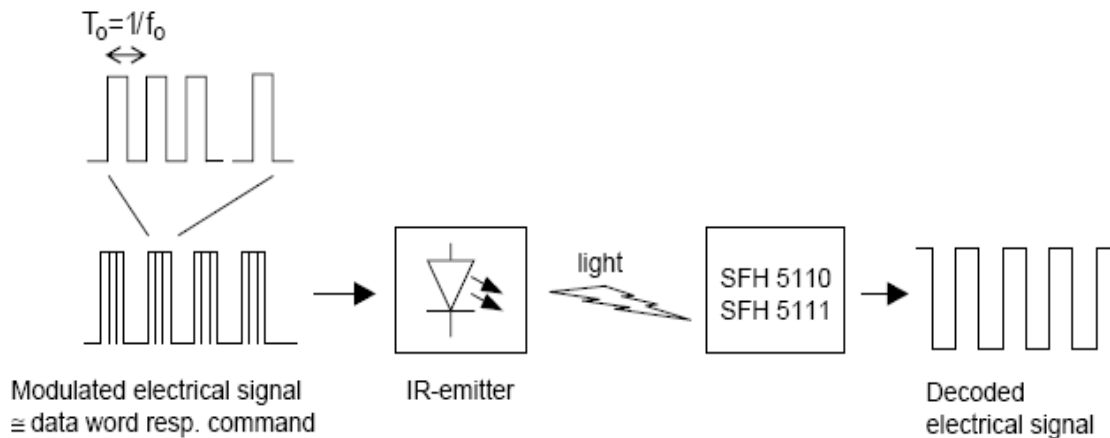
Na obrázku nižšie je uvedená schéma zapojenia jednoduchého senzora na detekciu prekážky. Obvod SFH5110 je pripojený k napájacímu napätiu 5 V cez RC filter, tvorený rezistorom R_1 a kondenzátorom C_1 . Ako optimálne parametre týchto súčiastok výrobca udáva $R_1 = 82 \Omega$ a $C_1 \geq 4,7 \mu F$. Keďže minimálne napájacie napätie na svorkách 2-3 je $V_{SFH5110} = 4,5$ V, hodnota R_1 by nemala byť vyššia ako 100Ω . Na blokovej schéme (Obrázok 3.3) je kolektorový odpor zapojený medzi výstupom a napájacím napätím. Ten slúži ako zdvíhací odpor. Vyšší výstupný prúd dosiahneme paralelným pripojením externého rezistoru R_3 (Obrázok 3.5), ktorý však nesmie byť menší ako $10 k\Omega$, v opačnom prípade môže dôjsť k poškodeniu IR prijímača.



Obrázok 3.5: Jednoduchý senzor na detekciu prekážok

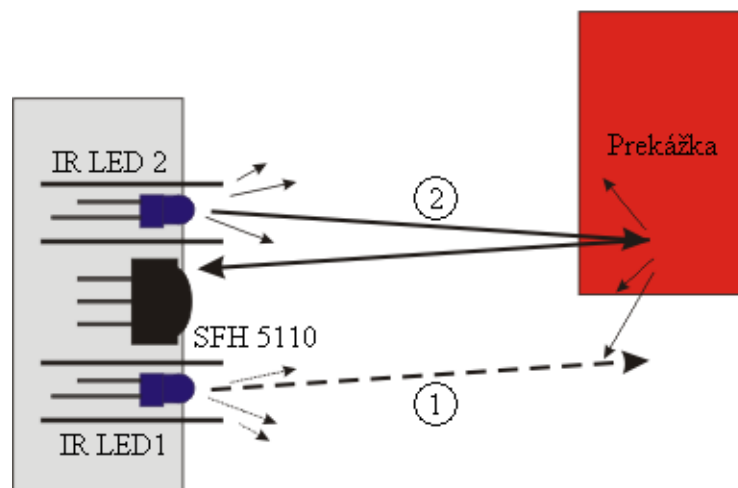
Ako vysielač použijeme infračervenú diódu (IR LED) budenú mikroprocesorom, ktorý generuje modulačný signál o frekvencii $f_0 = 40$ kHz (Obrázok 3.6), čo predstavuje dĺžku jednej periódy $25 \mu s$. Pre dosiahnutie citlivosti udávanej v katalógovom liste musí

byť dĺžka impulzu $t = 600 \mu\text{s}$. To znamená, že signál musíme modulovať ešte nižšou frekvenciou a každá perióda sa musí skladať z 24 impulzov (t/T_0). Pokiaľ v danej aplikácii postačuje nižšia citlivosť, je možné dĺžku impulzu skrátiť, avšak počet 25 μs impulzov v jednej perióde nesmie byť nižší ako 4, pretože by boli odfiltrované ako šum.



Obrázok 3.6: Modulácia a demodulácia dát pomocou SFH5110. Prevzaté z (7)

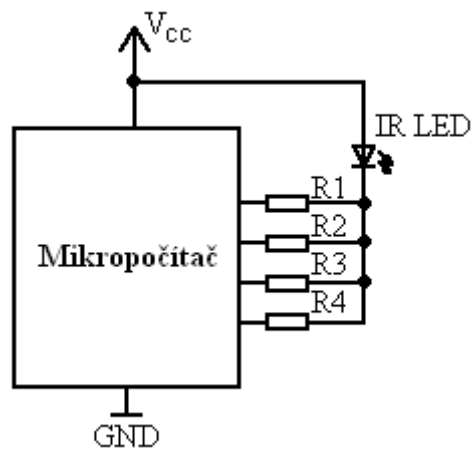
Senzor v uvedenom zapojení dokáže identifikovať či sa prekážka nachádza v jeho dosahu. Ďalšie úpravy budú spočívať v rozmiestnení senzorov, zmene počtu vysielacích prvkov a ich dosahu. Ako je podrobnejšie popísané v literatúre (6), doplnením senzoru o druhú IR diódu sa dá zistiť na ktorej strane pred robotom sa nachádza prekážka. Striedavo budíme pravú a ľavú LED diódu. Najskôr vysielajú IR LED 1, ktorej vyžarované svetlo **1** sa od prekážky neodrazí resp. sa odrazí signál slabý. Vieme teda, že na pravej strane sa prekážka nenachádza. Následne na to budeme budovať druhú IR LED diódu, ktorej signál **2** narazí na prekážku a časť žiarenia dopadá na detektor, čím môžeme približne určiť polohu prekážky. Táto informácia nám uľahčí rozhodovanie, ktorou stranou bude obchádzanie efektívnejšie.



Obrázok 3.7: Princíp detekcie polohy prekážky s dvomi IR LED

Meranie vzdialenosti k prekážke je možné realizovať zmenou výkonu vysielacej diódy. Najjednoduchším riešením je budenie pomocou niekoľkých rezistorov. Postupným znižovaním odporu zapojeného do série s LED diódou (Obrázok 3.8) sa bude znižovať aj dosah senzorov. V podstate sa jedná o zjednodušenú verziu D/A prevodníka, ktorý je taktiež možné použiť. Počet nastaviteľných úrovní je daný vzťahom 2^n , kde n je počet odporov, prípadne počet bitov D/A prevodníka. Vo

všeobecnosti platí, že väčší počet úrovní, znamená presnejšie meranie ale zároveň sa predlžuje čas potrebný na zistenie vzdialenosti k prekážke. Urýchliť meranie je možné aplikovaním pokročilejších metód vyhľadávania signálu ako napríklad delenie intervalov. Táto metóda môže výrazne skrátiť počet krokov merania ale takisto môže meranie predĺžiť. Vo väčšine situácií je výhodné uložiť si poslednú zaznamenanú vzdialenosť a otestovať najskôr túto pozíciu. Ak nebude prekážka zachytená, horný interval sa nastaví na maximálny dosah a testuje sa prítomnosť prekážky. Miesto D/A prevodníka je možné použiť PWM (pulzne šírková modulácia) moduláciu, ktorú sa dá riešiť softwarovo pomocou mikroprocesora a to bez ďalších komponentov. V zásade tu platí rovnaké pravidlo ako v predchádzajúcom prípade, čím väčšia presnosť, tým dlhšie meranie. Lit. (6)



Obrázok 3.8: Zmena intenzity vyžarovaného signálu

3.3 Ultrazvukové senzory

3.3.1 Princíp detekcie

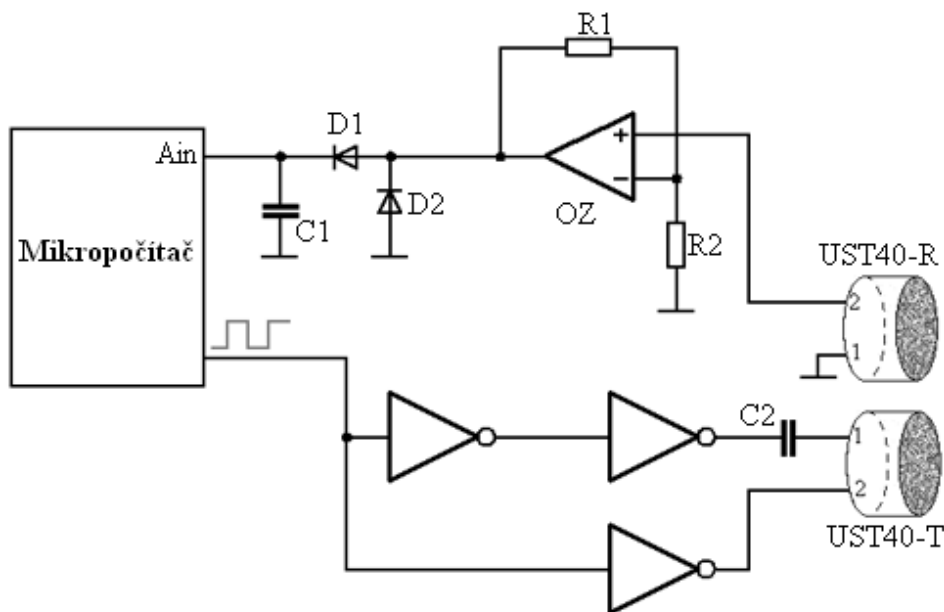
Základnými prvkami ultrazvukových sensorov sú nazývané elektroakustické meniče. V súčasnosti najpoužívanejšie sú meniče piezokeramické. Priložením elektrického napätia menia piezoelektrické kryštály svoje rozmery a naopak pôsobením mechanického napätia vzniká napätie elektrické. Za ultrazvuk sa považujú zvukové vlny šíriace sa na frekvencii nad 20 kHz a za hornú hranicu sa dnes pokladá frekvencia 1 GHz. Ultrazvukové meniče, ktoré sa využívajú v sensoroch pre mobilné roboty zvyčajne pracujú na frekvencii 40 kHz až niekoľko 100 kHz. Rýchlosť šírenia ultrazvukových vln je totožná s rýchlosťou zvuku. Je teda do značnej miery závislá od teploty a tlaku prostredia (vzduchu), v ktorom sa šíri. So stúpajúcou teplotou sa rýchlosť zvuku zvyšuje podľa vzťahu (1):

$$c = 331,82 + 0,607t \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}], \quad (1)$$

kde $331,82 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ je rýchlosť zvuku pri teplote $0 \text{ }^\circ\text{C}$ a $t \text{ [}^\circ\text{C]}$ je teplota vzduchu. So zvyšujúcim sa tlakom naopak táto rýchlosť klesá. Senzor na meranie vzdialenosti je teda založený na princípe merania doby, za ktorú sa vyslaná ultrazvuková vlna vráti späť ku zdroju. To nám umožňuje oproti optoelektronickým sensorom z nameraných údajov spočítať vzdialenosť senzora od prekážky. Môže byť zložený z jedného ultrazvukového meniča, ktorý funguje ako vysielač aj prijímač. Nevýhodou takého zapojenia je tzv. mŕtva zóna, čo je vlastne priestor v blízkom okolí senzoru, rádovo niekoľko centimetrov. V tejto oblasti senzor nebude schopný detegovať prekážku. Je nutné počkať, kým menič dokmitá resp. kým amplitúda doznievajúcich kmitov bude nižšia ako amplitúda odrazenej ultrazvukovej vlny aby bol schopný pracovať ako detektor. Tento nežiaduci efekt môžeme takmer úplne eliminovať použitím dvoch meničov, kde jeden menič bude pracovať ako prijímač a druhý ako vysielač. Dosah ultrazvukových sensorov je daný frekvenciou a výkonom meničov ako aj vlastnosťami prostredia, v ktorom sa ultrazvukové vlny šíria. Čím vyššia bude pracovná frekvencia meničov, tým nižší bude ich dosah. Meniče s frekvenciou 40 kHz majú maximálny dosah približne 10 m. Lit. (2), (6)

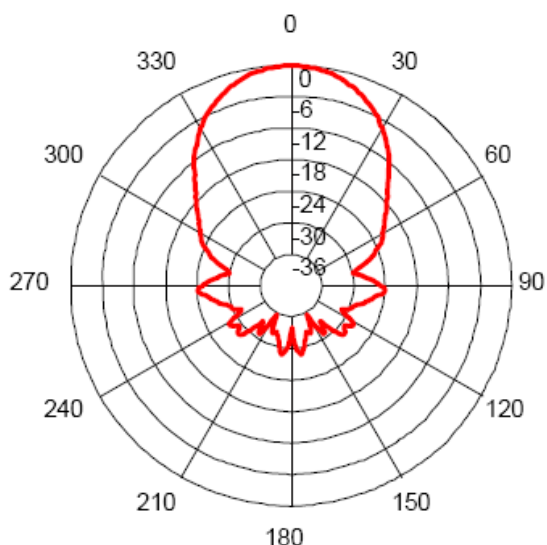
3.3.2 Zapojenie ultrazvukových sensorov

Základným prvkom senzora budú ultrazvukové meniče UST40/R (prijímač) a UST40/T (vysielač) pracujúce na frekvencii 40 kHz so šírkou pásma 2 kHz pre vysielač a 2,5 kHz pre prijímač. Tieto súčiastky sa v ČR bežne predávajú za necelých 100 Kč. Zapojenie (Obrázok 3.9) pozostáva s riadiaceho mikropočítača, ktorý generuje signál o frekvencii 40 kHz. Ten sa prúdovo zosilní pomocou invertorov a privádza sa na ultrazvukový menič UST40/T. Zmenou napätia sa menia geometrické rozmery piezoelektrických krištáľov a vysiela tak signál, ktorý sa pri náraze na prekážku odrazí späť. Od okamihu vyslania ultrazvukovej vlny začína mikropočítač merať čas. Signál dopadajúci na menič UST40/R spôsobí premenu mechanickej energie na elektrickú. Striedavé napätie sa zosilní v operačnom zosilňovači v neinvertujúcom zapojení a následne usmerní. Jednosmerné napätie je ďalej privedené na analógový vstup mikroprocesora a ten ho môže spracovať pomocou komparátora resp. A/D prevodníku. V tomto okamihu sa meranie času zastaví a zo zmeranej doby odozvy sa spočíta vzdialenosť prekážky od robota. Ako vyplýva zo vzťahu (1), vyššiu presnosť merania možno dosiahnuť doplnením obvodu o teplomer.



Obrázok 3.9: Príklad zapojenia ultrazvukového detektora prekážok

Ultrazvukové senzory sú schopné detegovať prekážky, ktoré by optickým senzorom unikli (sklo, tenké fólie) ale na druhej strane nastáva problém s malými predmetmi. Tie nemusia byť vždy spoľahlivo identifikované a môže sa teda stať, že senzor prekážku nedeteguje vôbec alebo zaznamená až objekt, ktorý sa nachádza za prekážkou. Podobný problém predstavujú hladké predmety, na ktoré dopadá signál pod ostrým uhlom. Ten sa následne odráža ďalej od robota a späť k detektoru sa vracia až od ďalšieho objektu alebo steny. Existuje tiež veľké riziko nesprávnej detekcie, kedy signál detegovaný senzorom pochádza od iného senzora. Tento problém sa rieši vhodným rozmiestnením senzorov a pauzou medzi meraniami, kedy sa najskôr počká aby dozol signál z prvého merania a až potom sa začne ďalšie meranie. Okrem toho nám senzor kvôli veľkému rozptylu vyslaného a odrazeného signálu neumožňuje presne určiť polohu prekážky. Dostávame iba informáciu o tom, že sa prekážka nachádza v oblasti vymedzenej tzv. vyžarovacou charakteristikou meniča (Obrázok 3.10).



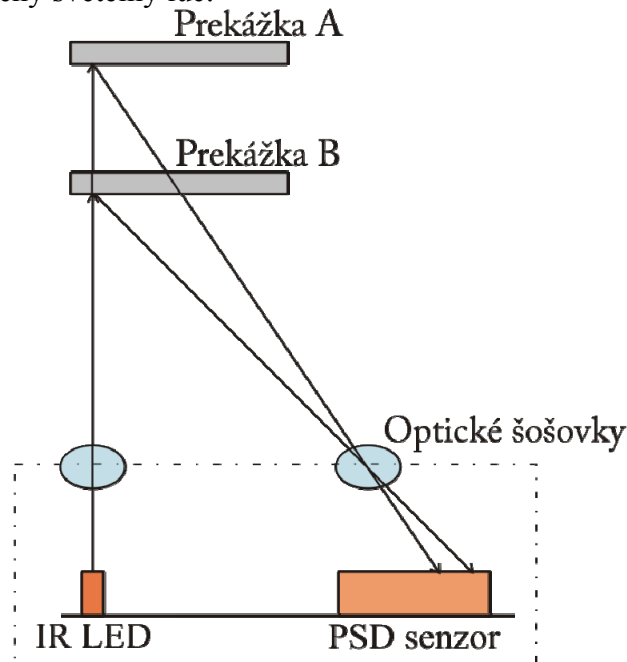
Obrázok 3.10: Vyžarovací diagram meničov UST40

3.4 Komerčné senzory

Okrem senzorov, ktoré si zostavíme zo základných elektronických súčiastok, je možné využiť aj komerčne predávané senzory. Ich obrovskou výhodou sú predovšetkým malé rozmery plynúce z integrácie do jedného púzdra. Okrem toho mnohé z týchto senzorov môžu poskytovať nami požadované údaje v digitálnej podobe. Nemusíme teda spracovávať zložité algoritmy ako previesť danú veličinu napr. na vzdialenosť alebo čas. Množstvo z nich komunikuje po sériovej zbernici alebo I2C, čím zároveň šetríme vstupno-výstupné porty mikropočítača. Hlavnou nevýhodou takto predávaných senzorov je však ich vysoká cena ako aj zlá dostupnosť v rámci ČR.

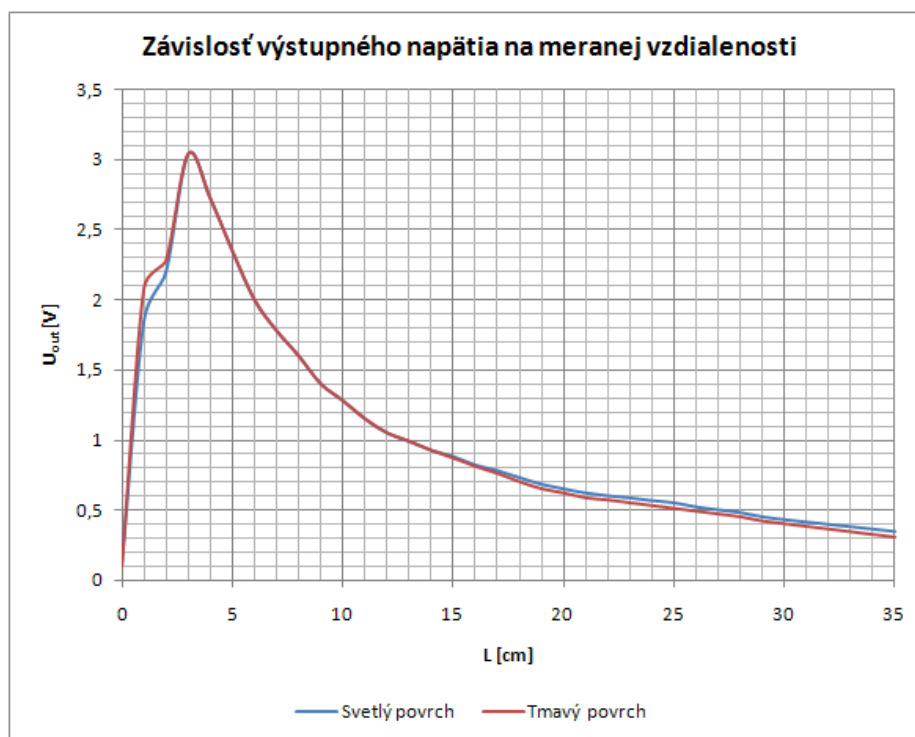
3.4.1 GP2D120

Je to infračervený merač vzdialenosti firmy Sharp v rozsahu 4 cm až 30 cm (Obrázok 3.13a). Tento senzor je založený na triangulačnej metóde. Tvoria ho infračervená dióda, PSD (Position Sensor Device) senzor a optické šošovky. Svetlo odrazené od objektov rôznej vzdialenosti dopadá na inú časť PSD senzora. Ten nepremieňa svetlo na elektrické napätie podľa veľkosti jeho intenzity ale podľa toho, kam dopadol odrazený svetelný lúč.



Obrázok 3.11: Meranie vzdialenosti pomocou triangulácie

Napájacie napätie je od 4,5 V do 5,5 V a odber prúdu je priemerne 33 mA. Obvod má analógový výstup, takže výstupné napätie je dané vzdialenosťou meraného objektu. Podľa údajov výrobcu je na vzdialenosti 30 cm výstupné napätie rovné 0,25 V až 0,55 V a mení sa nelineárne (Obrázok 3.12), pričom vyššiu rozlišovaciu schopnosť dosahuje senzor na menších vzdialenostiach. Doba trvania jedného merania je približne 39ms. Meranie prebieha nepretržite, čím odpadá nutnosť použitia riadiacej jednotky. Keďže sa jedná o optický senzor, je potrebné zvážiť jeho použitie v aplikáciách, kde by mohol byť vystavený priamemu žiareniu zo zdroja svetla.



Obrázok 3.12: Nelineárny výstup senzoru GP2D120

V prípade potreby je možné tiež využiť napríklad senzor GP2D12, ktorý sa oproti popisovanému typu odlišuje len optickou šošovkou a meria vzdialenosť od 10 cm do 80 cm. Ďalšie užitočné optické senzory sú uvedené tabuľke nižšie (Tabuľka 3.1). Sensory označované v tabuľke ako digitálne merajú len 2 úrovne, tj. objekt je v dosahu senzora alebo nie je. Údaje sú prevzaté z katalógových listov jednotlivých súčiastok. Jedná sa o hodnoty označené ako typické a maximálne resp. minimálne hodnoty sa teda môžu líšiť. (8)

Tabuľka 3.1: Optické senzory firmy Sharp

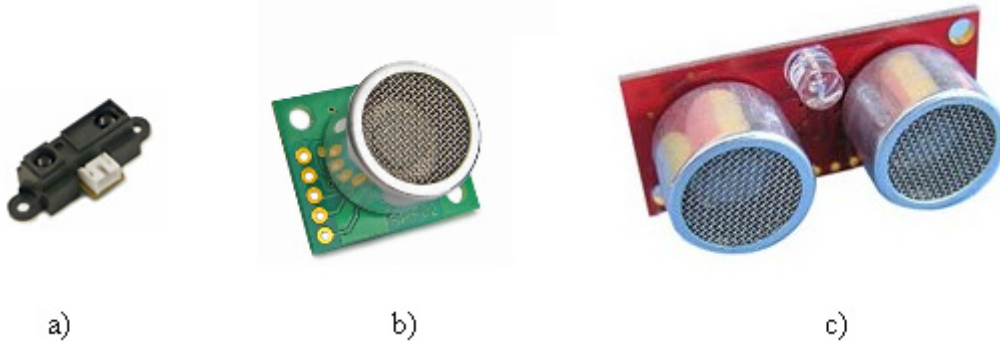
Typ	Rozsah	Typ výstupu	Doba merania	Odber prúdu
GP2Y0AH01	4-6 mm	analógový	39 ms	20 mA
GP2D120	4-30 cm	analógový	39 ms	33 mA
GP2D12	10-80 cm	analógový	39 ms	-
GP2Y0D805	5 cm	digitálny (1b)	4 ms	6,5 mA
GP2Y0D810	10 cm	digitálny (1b)	4 ms	6,5 mA

3.4.2 SRF02

Jedná sa o ultrazvukový merač vzdialenosti s jedným meničom o frekvencii 40 kHz (Obrázok 3.13b). Napájacie napätie je 5 V a odber prúdu okolo 4 mA. SRF02 môže komunikovať s nadriadenou jednotkou pomocou zbernice UART alebo I2C, pričom na jednej zbernici môže byť pripojených až 16 zariadení. Senzor pracuje v režime prijímača alebo vysielača. Vzhľadom na to, že pozostáva iba z jedného meniča, je najmenšia merateľná vzdialenosť približne 15cm. Meranie prebieha automatickým analógovým zosilnením v 64 krokoch. Maximálna meraná vzdialenosť je 6 m a vyžarovací uhol 55°. Výstupom merania je čas v mikrosekundách, vzdialenosť v centimetroch alebo v palcoch. Cena sa pohybuje okolo 500 – 600 Kč. (9)

3.4.3 SRF08

Ultrazvukový diaľkomer SRF08 (Obrázok 3.13c) na rozdiel od predchádzajúceho typu obsahuje 2 meniče, pracujúce na frekvencii 40 kHz. Umožňuje tak meranie vzdialenosti od 3 cm do 6 m pri vyžarovacom uhle 55°. Pripojenie k mikropočítaču je realizované pomocou zbernice I2C. Adresa zariadenia je nastaviteľná v rozsahu E0 až FE, takže na zbernicu je možné pripojiť 16 týchto senzorov. Maximálny dosah, ako aj doba merania sú regulovateľné pomocou riadiacich registrov. Analógové zosilnenie má 32 krokov. Štandardná doba merania je nastavená na 65ms, čo prevyšuje maximálnu merateľnú vzdialenosť takmer dvojnásobne. SRF08 môže pracovať v ANN (Artificial Neural Network) móde, ktorý je navrhnutý na jednoduché spracovanie viacerých odrazov pomocou neurónových sietí. Meranie ako aj 32B buffer sa rozdelia na 32 častí. Každý byte v zásobníku bude reprezentovať 352 mm vzdialenosti. Pokiaľ nebol zaznamenaný na danom úseku žiadny odraz, register bude obsahovať hodnotu 0. V štandardnom móde sú výsledky merania ukladané do dvojíc registrov, pričom každá dvojica predstavuje jeden odraz. Pokiaľ je v niektorej dvojici uložená hodnota 0, ďalšie odrazy už neboli zaznamenané. Okrem toho je pri každom meraní vzdialenosti merané aj osvetlenie. To je reprezentované jedným bytom. Celý modul je napájaný napätím 5 V a má odber prúdu 3mA v režime Idle a priemerne 15 mA behom merania. Výsledky merania sú opäť v centimetroch, palcoch alebo mikrosekundách. Tento senzor sa v ČR predáva približne za 1400 Kč. Lit. (9)

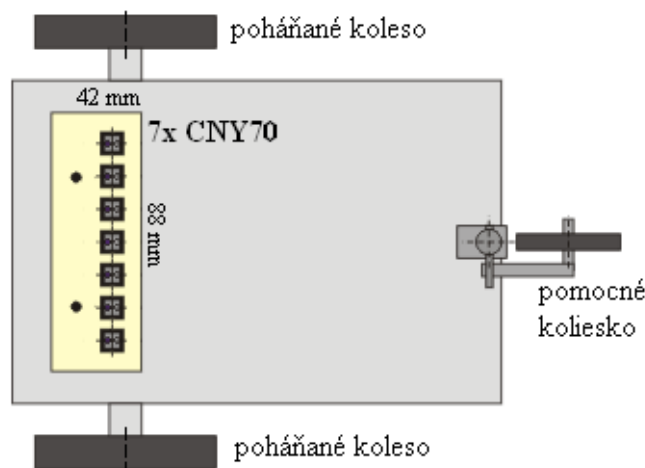


Obrázok 3.13: a) IR senzor GP2D120, ultrazvukové merače b) SRF02, c) SRF08

4 Návrh obvodového zapojenia

4.1 Sledovanie čiary

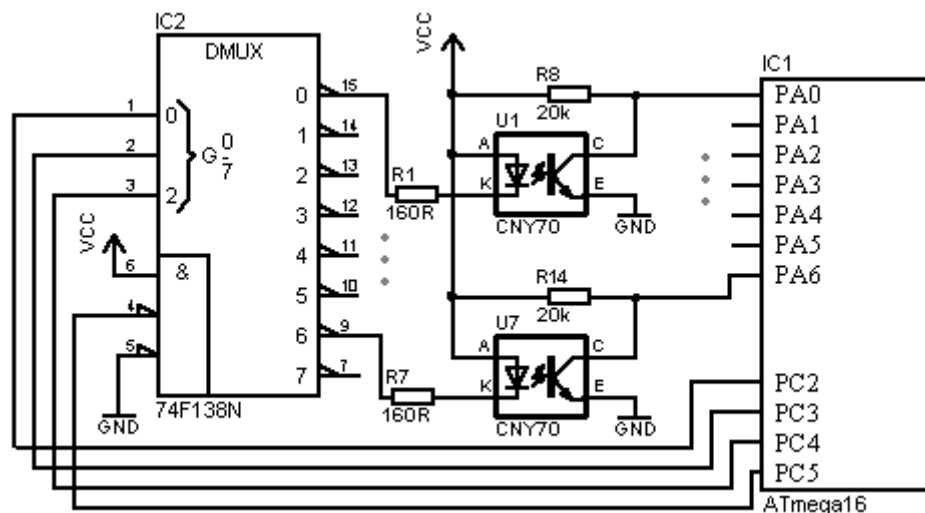
Senzory na sledovanie čiary sú realizované pomocou siedmych reflexných optočlenov CNY70 usporiadaných v jednom rade. CNY70 obsahuje pár fototranzistor, infračervená LED dióda v spoločnom puzdre a filter denného svetla, ktorý ho robí citlivým len na IR žiarenie. V prípade robota s diferenciálnym riadením, je vhodné umiestniť senzory medzi poháňané kolesá, tak aby bol prostredný z nich v osi otáčania robota (Obrázok 4.1). Toto umiestnie ale nie je vždy možné pretože podvozky s diferenciálnym riadením majú na tomto mieste často umiestnené motory. V takom prípade je potrebné umiestniť ich aspoň čo najbližšie tomuto miestu, podľa možnosti do prednej časti robota. Optimálna výška je 3 až 4 mm od povrchu.



Obrázok 4.1: Ideálne umiestnenie senzorov na trojkolesový podvozok

Pre správnu činnosť senzora pri vzdialenosti 3 mm od povrchu dráhy, musí IR diódou tiecť prúd okolo 23 mA. Vzhľadom na to, že mobilný robot bude napájaný z batérie je nutné znížiť jeho spotrebu na minimum. Navrhnutý systém je možno vybaviť 3 až 8 optočlenmi CNY70, pričom použitý robot bude osadený 7 takýmito senzormi. Počet je volený s ohľadom na rozmery robota ako aj na neznámu hrúbku čiary a možnosti navigácie. Senzory sú budené pomocou demultiplexera 74F138 (viz. Obrázok 4.2), riadeného 3bitovou adresou a 3 vývodmi „Input Enable“ pre odpojenie vstupu. Na ovládanie demultiplexera využijeme celkom 4 vstupy (3 adresné a jeden Input Enable). Výsledkom tohto riešenia je nižšie prúdové zaťaženie mikroprocesora, menej použitých I/O pinov a zároveň zníženie spotreby. Samozrejme treba brať do úvahy aj odber demultiplexera, ten je však stále podstatne menší ako odber vybudenej IR LED diódy. Pracovný bod fototranzistorov v CNY70 nastavíme pomocou rezistora zapojeného medzi kolektorom a napájacím napätím. Hodnotu tohto rezistora zvolíme tak, aby pri bielom povrchu bola na kolektore nízka úroveň napätia (do 1 V) a pri čiernom povrchu vysoká úroveň (nad 3 V). Táto podmienka ja splnená pri odpore 20 kΩ. Kolektor fototranzistora pripojíme na port A mikroprocesora Atmel ATmega16, ktorý je vybavený 10 bitovým A/D prevodníkom práve na tomto porte. Senzorový systém v navrhnutom zapojení preto môže pracovať v 2 režimoch, pričom voľba režimu bude prebiehať automaticky na základe podmienok na trati alebo manuálne riadiacou jednotkou robota. Prvý z režimov je použiteľný v prípade správnej montáže senzorov na podvozok a dostatočného kontrastu medzi čiarou a podložkou. Identifikácia čiary

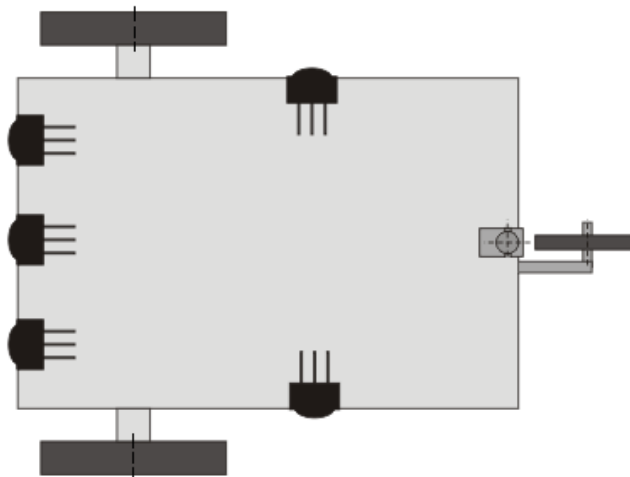
prebehne presne a vo veľmi krátkom čase, výstupné napätie na senzoroch ale musí zodpovedať logickým úrovniám mikroprocesora. Ak by táto podmienka nebola splnená, je nutné použiť druhý z režimov, kde bude napätie na senzoroch merané pomocou A/D prevodníka. Ten dovoľuje rozlíšiť až 2^{10} (1024) rôznych úrovní výstupného napätia. Je teda schopný identifikovať rozdiel medzi podložkou a čiarou aj v prípade nižšieho kontrastu alebo väčšieho rušenia. Mikroprocesor pred jazdou skalibruje senzory a do pamäte si uloží zmeranú hodnotu napätia pre oba typy povrchov. Pri tomto spôsobe kalibrácie už nie je potrebné zdĺhavé manuálne nastavenie senzorov pred každou jazdou, nastavenie prebehne automaticky počas niekoľkých milisekúnd. Počas jazdy bude hodnoty z výstupov CNY70 porovnávať s uloženou hodnotou, ktorej sa priradí tolerancia a na jej základe obslužný program rozhodne, či sa jedná o čiaru alebo podložku. Zložitejší vyhodnocovací algoritmus a doba trvania A/D prevodu sa prejaví aj podstatne dlhším meraním, čo je hlavnou nevýhodou tohto režimu. Kompenzáciou za nižšiu rýchlosť je rozlíšenie rôznych farieb povrchu a vysoká odolnosť voči rušeniu aj za neprimeraných podmienok.



Obrázok 4.2: Pripojenie senzorov na sledovanie čiary k mikroprocesoru

4.2 Detekcia prekážky

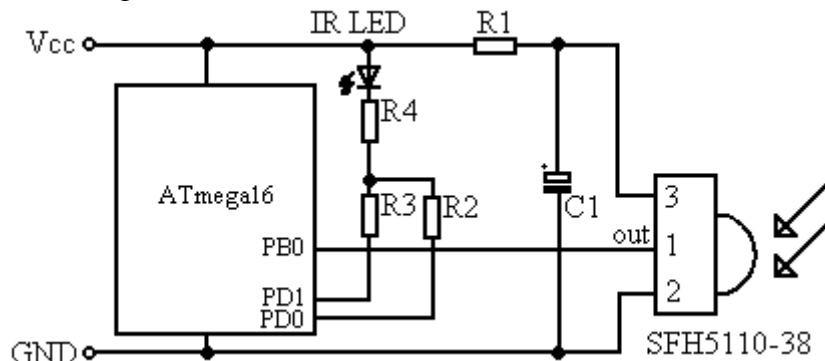
Prekážku na trati budeme detegovať pomocou infračervených senzorov, ktorých rozmiestnenie je znázornené na obrázku (Obrázok 4.3).



Obrázok 4.3: Rozmiestnenie senzorov na detekciu prekážky

Senzory v prednej časti robota slúžia na identifikáciu prekážky a jej približnej vzdialenosti. Ako už bolo uvedené v teoretickej časti tejto práce nie je možné stanoviť presnú vzdialenosť pretože sa svetlo odráža od každého predmetu iným spôsobom. Je ale možné stanoviť ju v určitých intervaloch. V tomto prípade sú to tri stupne vzdialenosti - blízko, stredne ďaleko a ďaleko. Samozrejme si teraz možno položiť otázku prečo iba tri stupne, no je to z jednoduchého dôvodu. Robot tohto charakteru nepotrebuje presný údaj, ale rýchlu odpoveď, či sa pred ním prekážka nachádza alebo nie. Dôležité je aby mal tento údaj rýchlo a pri čo najnižšej spotrebe elektrickej energie. Nepotrebuje tiež senzory schopné zachytiť prekážku na druhej strane miestnosti, pretože takéto údaje nedokáže využiť a sú teda zbytočné. Ak je prekážka ďaleko, robot spomalí ak je stredne ďaleko mal by ju začať okamžite obchádzať a ak sa nachádza blízko, hrozí kolízia. Sensory musia umožniť detegovať prekážku a následne ju obísť.

Na bočných stranách sú umiestnené pomocné senzory, ktoré sa využívajú len pri obchádzaní prekážky a preto je nutné aby ich v prípade potreby aktivovala riadiaca jednotka robota príslušným príkazom. Ich výstupom je diskretný signál, závislý na tom či sa prekážka nachádza v dosahu alebo nie. Tieto senzory by mali byť umiestnené za poháňanými kolesami. Pokiaľ robot prešiel túto hranicu a prekážku už nedeteguje môže sa bezpečne otočiť a pokračovať smerom k čiare.



Obrázok 4.4: Pripojenie senzora na detekciu prekážky k mikroprocesoru

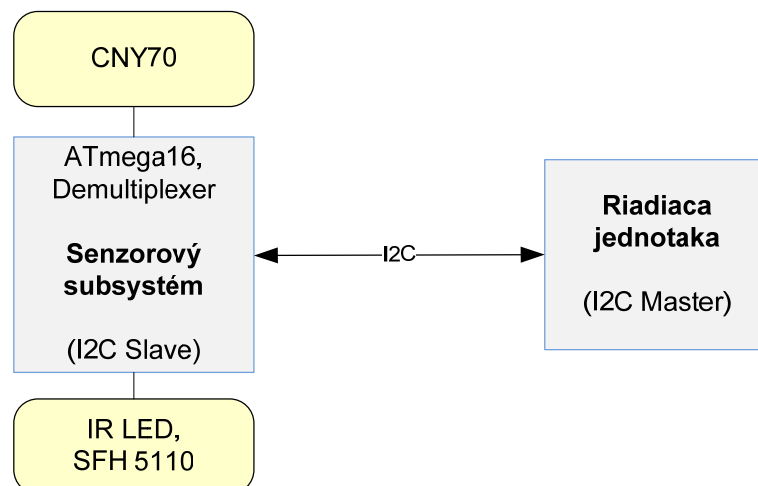
Každý zo senzorov pozostáva z IR prijímača s demodulátorom SFH5110-38, infračervenej LED diódy LD274-3 a rezistorov na nastavenie vyžarovaného výkonu, zapojených medzi IR LED a mikroprocesorom (Obrázok 4.4). Rezistory R_2 a R_3 sú pripojené na trojstavový výstup mikroprocesora a umožňujú regulovať prúd tečúci IR LED diódou a zároveň dosah senzorov. Pokiaľ sú oba pripojené na nízku úroveň, vyžarovaný výkon a teda aj dosahovaná vzdialenosť sú najväčšie. Pokiaľ je jeden z nich pripojený na nízku úroveň a druhý výstup je v stave vysokej impedancie, pretekajúci prúd sa zníži podľa Ohmovho zákona a bude mu zodpovedať aj dosah senzorov. Ak sú oba výstupy v stave vysokej impedancie, IR LED je vypnutá. V prípade bočných senzorov je rezistor R_2 vynechaný. Rezistor R_4 tvorí predradný odpor a zvyšuje celkový odpor paralelnej kombinácie tak, aby bolo možné dosiahnuť požadovaného výstupného výkonu vo všetkých kombináciách. Napájacie napätie detektora je pripojené cez RC článok na $V_{CC} = 5$ V. Impulzy s periódou opakovania $26,3 \mu s$ sú generované mikroprocesorom, pričom pre spoľahlivú funkciu je tento signál ešte modulovaný nižším kmitočtom. Mikroprocesor generuje 15 impulzov ($15 \cdot 26,3 \mu s = 394 \mu s$). Potom nasleduje $394 \mu s$ pauza a v prípade, že bude detegovaná prekážka meranie sa zopakuje aby sa vylúčila chybná detekcia. Do obslužného programu nebola implementovaná priama podpora merania vzdialenosti pomocou PWM modulácie, keďže vyššie popísané riešenie je plne postačujúce. Pomocou príslušných príkazov (zoznam je uvedený v prílohe C) má však riadiaca jednotka robota možnosť ovplyvniť činiteľ plnenia

a frekvenciu generovaného signálu. Týmto spôsobom je možné niekoľkonásobné zvýšenie ale aj zníženie dosahu senzorov.

Podobne ako pri sledovaní čiary aj tu je na výber z niekoľkých režimov detekcie. Čelné senzory je možné aktivovať sekvenčne a určiť tak približne, na ktorej strane a v akej vzdialenosti pred robotom sa prekážka nachádza. V prípade potreby je možné použiť režim rýchlej detekcie, kedy sa vysielajú a spracúvajú signály pre všetky 3 senzory súčasne. Toto meranie je síce rýchlejšie ale neumožňuje zistiť, z ktorej strany sa svetlo odrazilo. Možno ho preto považovať len za orientačné a navyše energeticky náročné. Treťou možnosťou je aktivovať iba prostrednú IR diódu avšak čítať údaje so všetkých troch čelných senzorov, čo vzhľadom na rozloženie senzorov umožní detegovať prekážku aj v prípade, že sa od nej odráža svetlo pod takým uhlom, pri ktorom by nedopadlo na detektor tohto senzora.

4.3 Senzorový subsystém ako celok

Navrhnutý modul je rozdelený na 3 základné bloky (Obrázok 4.5), ktoré spoločne tvoria senzorový subsystém. Sú to senzory na sledovanie čiary, senzory na detekciu prekážky a riadiaca jednotka. Jadrom riadiacej jednotky je mikroprocesor ATmega16, pracujúci na frekvencii 8 MHz, ovláda oba typy senzorov a zároveň komunikuje s riadiacou jednotkou robota. Komunikácia prebieha pomocou zbernice I2C, ku ktorej sa možno pripojiť pomocou vyvedeného konektora. Zároveň sú tu neosadené rezistory R_1 , R_2 na vytvorenie vlastnej zbernice (pre prípadné budúce využitie). Rezistory R_3 , R_4 slúžia len ako ochrana a možno ich preto nahradiť skratom. Na doske sú ďalej vyvedené dva napájacie konektory. Jeden slúži na napájanie senzorového subsystému, pričom sa predpokladá stabilizované napájacie napätie v rozsahu 4,6 až 5,5V a druhý napája senzory na sledovanie čiary. Demultiplexer je súčasťou riadiacej jednotky z dôvodu minimalizácie rozmerov dosky plošného spoja senzorov na sledovanie čiary. Jednotlivé senzory sú k riadiacej jednotke pripojené pomocou plochých viac žilových káblov a príslušných konektorov. Pre prípadné softwarové úpravy je súčasťou plošného spoja tiež ISP konektor. Schémy zapojenia celého systému ako aj dosky plošných spojov a osadzovacie plány sú v prílohe A. Zoznam použitých súčiastok je v prílohe B.

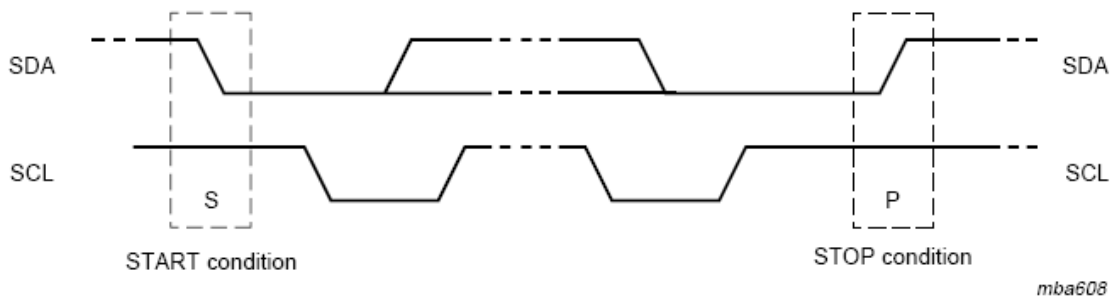


Obrázok 4.5: Bloková schéma navrhnutého modulu

5 Spracovanie údajov

5.1 Zbrnica I2C

Senzorový systém bude komunikovať s nadriadenou jednotkou pomocou zbernice I2C (Inter Integrated Circuit), spoločnosťou Atmel označovanej ako TWI (Two Wire Interface). Jedná sa o dvojvodičovú sériovú zbernicu určenú predovšetkým na komunikáciu medzi obvodmi jedného zariadenia. Vodič s označením SDA (Synchronous Data) slúži na prenos dát a vodič SCL (Synchronous Clock) je synchronizačný. Oba vodiče sú cez zdvíhací odpor pripojené na kladné napájacie napätie. Počet zariadení, ktoré je možné pripojiť je obmedzené 7bitovou adresou na 128 a ďalej limitované kapacitou. Zariadenia sa delia na Master a Slave. Komunikáciu začína vždy zariadenie typu Master vyslaním podmienky Start (Obrázok 5.1), 7 bitovej adresy a bitu R/W (Read/Write). Pokiaľ zariadenie typu Slave rozpozná svoju adresu, potvrdí príjem bitom ACK. Potom nasledujú dáta vysielané jedným zo zariadení, v závislosti na bite R/W a komunikácia sa ukončí vyslaním podmienky Stop. Lit.(10)



Obrázok 5.1: Začiatie a ukončenie vysielania na zbernici I2C. Prevzaté z (10)

V mikroprocesoroch rady AVR je zbrnica riadená pomocou niekoľkých registrov. Register TWBR (TWI BitRate Register) slúži spolu s preddeličkou na nastavenie bitovej rýchlosti signálu SCL. Tá je daná vzťahom (2), kde f_{SCL} je frekvencia I2C zbernice, f_{CPU} je pracovná frekvencia mikroprocesora a TWPS hodnota preddeličky zapísaná v registri TWSR.

$$f_{SCL} = \frac{f_{CPU}}{16 + 2 \cdot (TWBR) \cdot 4^{TWPS}} \quad [\text{Hz}], \quad (2)$$

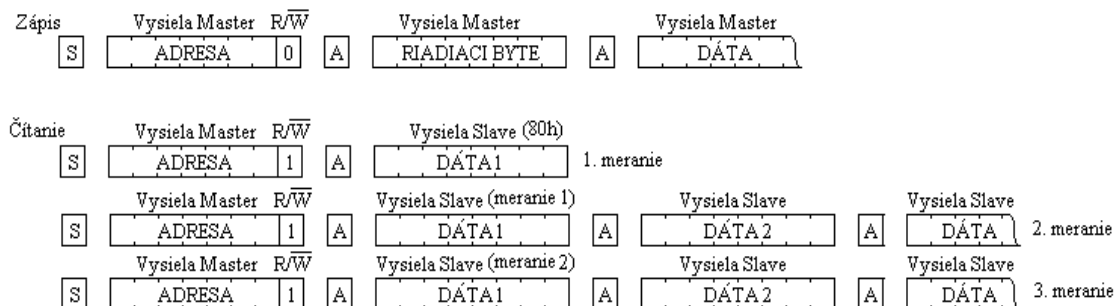
Register TWSR (TWI Status Register) poskytuje informácie o aktuálnom stave zbernice a zároveň jeho najnižšie 2 bity slúžia na nastavenie preddeličky. Operácie na zbernici sú riadené bitmi registra TWCR (TWI Control Register):

- TWINT TWI Interrupt Flag – bit je nastavený po ukončení udalosti na zbernici
- TWEA TWI Enable Acknowledge Bit – potvrdzovanie komunikácie bitom ACK
- TWSTA TWI Start Condition – generuje podmienku START na zbernici
- TWSTO TWI Stop Condition – generuje podmienku STOP na zbernici
- TWEN TWI Enable – povoľuje operácie na zbernici a aktivuje rozhranie TWI
- TWIE TWI Interrupt Enable – povoľuje prerušenie od TWI, pokiaľ je povolené globálne prerušenie

Odosielané a prijaté dáta sú ukladané v registri TWDR (TWI Data Register). Každé zariadenie pracujúce ako Slave musí mať nastavenú svoju adresu v registri TWAR (TWI Address Register), ktorého najnižší bit zároveň určuje či bude reagovať na adresu 0x00 (General Call). Podrobný popis jednotlivých registrov a statusov je uvedený v katalógovom liste mikroprocesora ATmega16 viz. lit.(4).

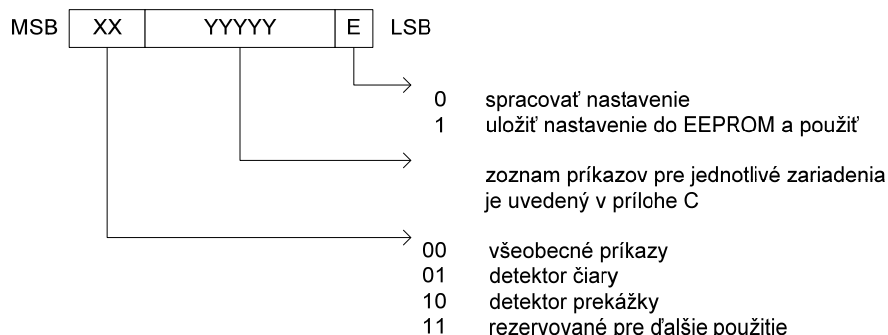
5.2 Komunikačný protokol

Senzorový subsystém podporuje množstvo funkcií a pracovných režimov. Jeho správanie je preto možné ovládať sadou príkazov a nastavení priamo riadiacou jednotkou robota po zbernici I2C bez toho aby bolo nutné zasahovať do zdrojového kódu (Obrázok 5.2).



Obrázok 5.2: Zápis riadiaceho bytu a čítanie údajov zo senzorov

Ak riadiaca jednotka sensorového subsystému zachytí na zbernici I2C, svoju adresu nasledovanú bitom pre zápis (Write), očakáva dáta, ktoré si uloží do pamäte a následne vyhodnotí. V tomto režime prijíma sensorový systém jeden byte obsahujúci príkaz, ktorý môže ale nemusí byť nasledovaný ďalším dátovým bytom. Príkaz pozostáva z troch častí ako je to znázornené v nasledujúcom diagrame (Obrázok 5.3).



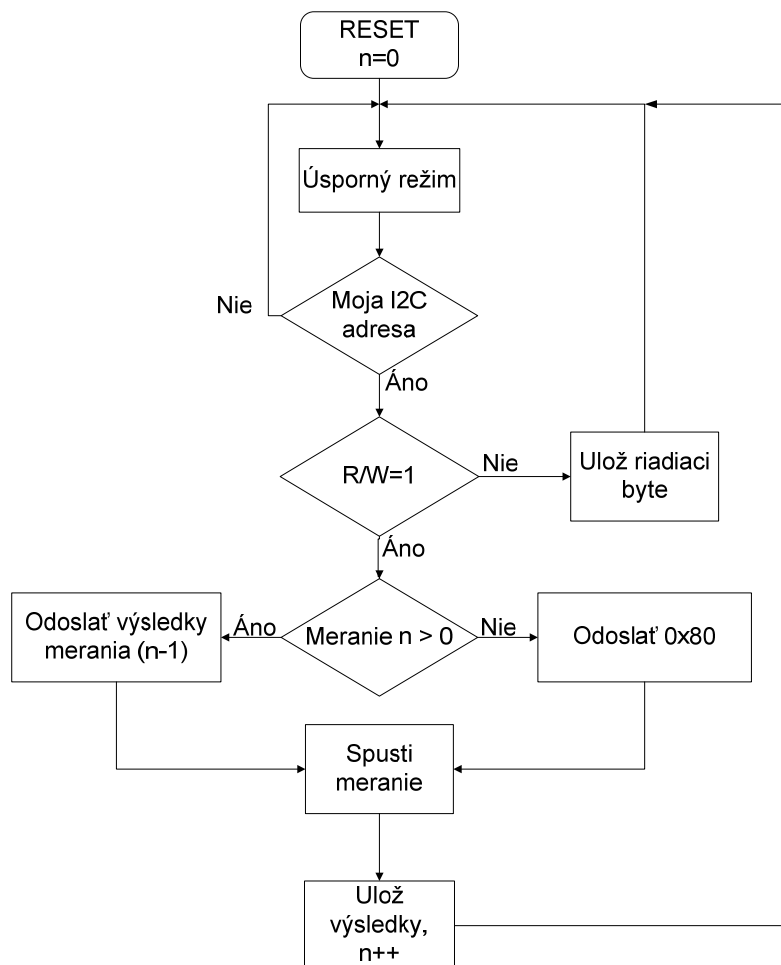
Obrázok 5.3: Štruktúra bytu s príkazom

Najnižší bit určuje, či bude nastavenie uložené do internej pamäte EEPROM a nahradí tak natrvalo predvolené hodnoty alebo sa vykoná a po odpojení napájania sa obnoví pôvodná hodnota. Uložiť je možné iba príkazy, ktoré menia parametre systému a teda zvyčajne obsahujú ďalší dátový byte. Adresa pre uloženie je daná všetkými ôsmimi bitmi príkazu. 5 bitov označených ako YYYYY určuje konkrétnu udalosť, jedná sa o nastavenie premenných resp. pracovných režimov a je tak možné priamo ovplyvniť spoľahlivosť a výkon senzorov. Najvyššie dva bity určujú zariadenie, ktorého sa príkaz týka. Ich význam spočíva hlavne v zmenšení počtu skokov pri rozpoznávaní väčšieho množstva príkazov a teda zefektívňujú samotné rozpoznávanie. Zoznam všetkých príkazov je uvedený v prílohe C.

V prípade nastavení je možné zmeniť napr. Slave adresu zariadenia a povoliť alebo zakázať využívanie určitých senzorov, spustiť kalibráciu a podobne. Väčšina príkazov sa pri nastavenom bite E uloží a zároveň aj vykoná. Ak tento bit nie je nastavený, uloží sa príkaz do premennej a počas behu programu sa správa identicky akoby bol tento bit nastavený. Výnimkou je voľba úsporného režimu. V prípade nastaveného bitu E sa uloží typ úsporného režimu do pamäte EEPROM a použije sa štandardne po skončení merania ako to ukazuje vývojový diagram (Obrázok 5.4).

Ak bit E tohto príkazu nie je nastavený systém prejde okamžite po rozpoznaní príkazu do daného typu úsporného režimu, ale po prebudení sa bude naďalej využívať predchádzajúce nastavenie. Príkaz teda slúži na okamžité a jednorázové uspatie systému (napr. v dobe kedy nie je potrebný). Sensorový subsystém umožňuje prístup k parametrom, ktorých nesprávnym použitím možno spôsobiť jeho dočasnú alebo aj trvalú nefunkčnosť. Treba preto zvážiť, ktoré parametre v danej situácii možno zmeniť a ako. Napríklad pri spomínanom úspornom režime je nutné brať do úvahy v akých intervaloch sú požadované merania a čas, za ktorý sa systém z nastaveného režimu dokáže prebudiť.

Ak je bit za adresou nastavený do 1 (Read), potvrdí riadiaca jednotka príjem bitom ACK a keďže v okamihu prvej požiadavky ešte nie sú k dispozícii žiadne namerané údaje, odošle byte 0x80 oznamujúci spustenie merania podľa uložených nastavení. Všetky zmerané údaje sa spracujú požadovaným spôsobom, uložia do pamäte a budú poskytnuté nadriadenému mikroprocesoru pri najbližšej požiadavke.

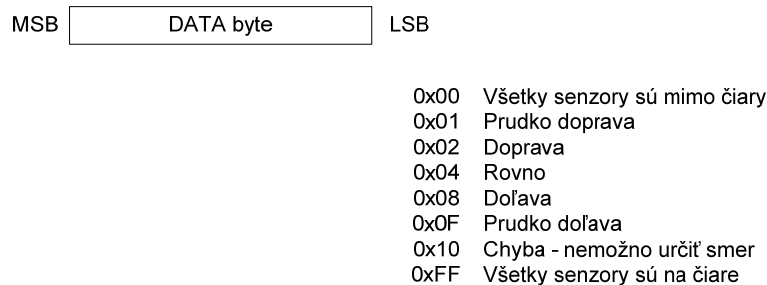


Obrázok 5.4: Zjednodušený vývojový diagram

5.3 Vyhodnotenie zmeraných údajov

Spôsob akým budú vyhodnotené a následne odoslané údaje zo senzorov je závislý na režime zvolenom riadiacou jednotkou robota. Ako už bolo vysvetlené v predchádzajúcich kapitolách sledovanie čiary využíva dva základné režimy a od nich sa odvíja aj formát dát. V režime s A/D prevodníkom sú prístupné štyri spôsoby vyhodnotenia:

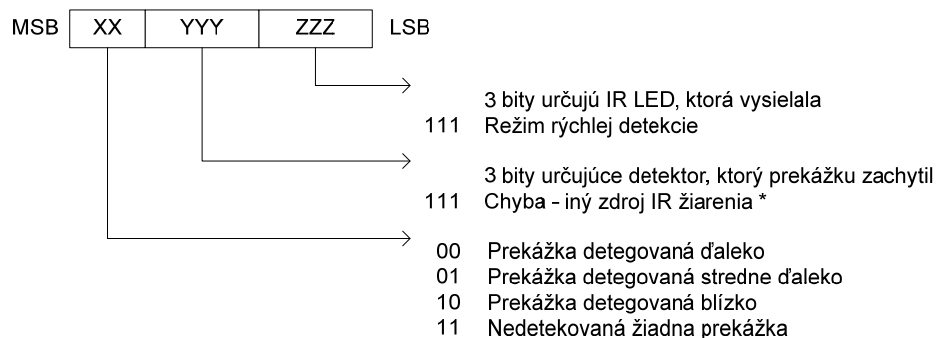
- Smer jazdy – senzorový systém posielajú riadiacej jednotke údaje o tom, na ktorú stranu a s akou intenzitou má zmeniť smer. Princíp vyhodnotenia je jednoduchý, podľa počtu senzorov sa spočítajú nulové bity od stredu smerom k obojstranným stranám. Na ktorej strane bude viac nulových bitov na tú stranu treba zabočiť. Formát odosielaných údajov je uvedený nižšie (Obrázok 5.5).



Obrázok 5.5: Formát údajov v režime s určením smeru jazdy

- Logické úrovne – v tomto režime sú zmerané údaje zo všetkých senzorov vyhodnotené ako čiara/podložka, resp. log1/log0 a uložené do jedného bytu od LSB smerom k MSB. Tento byte je odoslaný riadiacej jednotke robota, ktorá ich sama ďalej vyhodnotí.
- Režimy 8/10 bitov – sú prístupné iba pri meraní pomocou A/D prevodníka. Riadiacej jednotke sú posielané buď presne zmerané hodnoty vo forme 2 bytov na každý senzor pre 10bitový režim alebo jeden byte na senzor v 8bitovom režime. Konverzia na 8 bitov spočíva v posunutí zmeranej hodnoty o 2 bity doprava a jej výhodou je jednoduchšie spracovanie a skrátenie času prenosu dát.

Senzory na detekciu prekážky zasielajú riadiacej jednotke vždy toľko bytov, koľko je aktívnych senzorov (Obrázok 5.6). Pokiaľ je senzor v postupnosti vypnutý, byte sa neposiela. Senzory sú indexované od nuly a ich poradie je nasledovné: prostredný vpredu, pravý predný, ľavý predný, pravý bočný, ľavý bočný senzor.



* V režime rýchlej detekcie predstavujú jednotlivé bity čelný senzor, ktorý zachytil IR žiarenie, meranie sa neopakuje, takže nesignalizuje chybový stav, tento režim má iba informatívny charakter.

Obrázok 5.6: Formát odosielaných údajov - detekcia prekážky

6 Dosiahnuté parametre

6.1 Doba merania

Pomocou osciloskopu boli zmerané najdôležitejšie parametre senzorov ako aj jednotlivých komponentov. Tabuľka 6.1 uvádza maximálne časy pre jednotlivé procesy. V prípade, že by robot v danej situácii potreboval zvýšiť rýchlosť merania, môže tieto doby upraviť zmenou predvolených parametrov príslušným príkazom. Uvedené hodnoty sú dosahované s rezervou tak, aby boli zaistené spoľahlivé výsledky pri detekcii čiary aj prekážky a to aj v prípadoch, ktoré v reálnej situácii nemôžu nastať. Nie sú tu započítané časy spracovania nameraných údajov, príkazov a ostatných úloh, ktoré systém môže riešiť. Riadiaca jednotka robota by mala byť na základe týchto meraní optimalizovaná tak, aby nedochádzalo k veľkému množstvu predčasných požiadaviek na výsledky meraní na úkor iných procesov, ktoré môže v tejto dobe vykonávať. Zároveň je možné lepšie prispôbiť rýchlosť pohybu robota možnostiam jeho senzorov a zaistiť tak vyššiu spoľahlivosť.

Tabuľka 6.1: Doby trvania sledovaných procesov

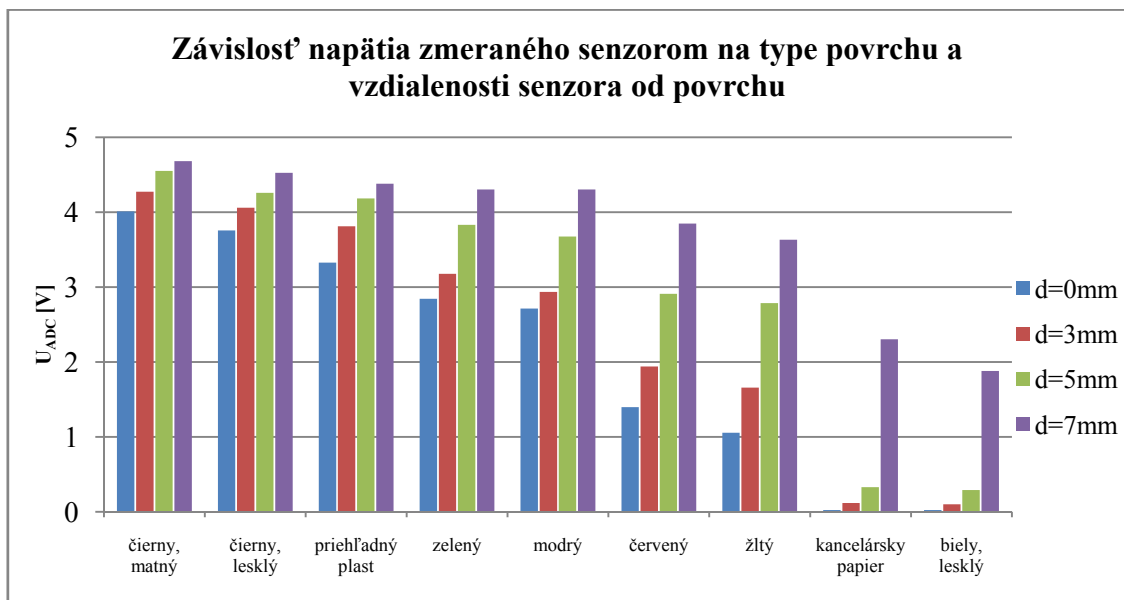
Sledovanie čiary	
Doba jedného merania v režime s vyhodnotením logických úrovní	79,6 μ s
Doba jedného merania v režime s A/D prevodom	291 μ s
Trvanie jedného cyklu merania (7 senzorov) v režime s vyhodnotením logických úrovní	587 μ s
Trvanie jedného cyklu merania (7 senzorov) v režime s A/D prevodom	2,06 ms
Čas medzi dvomi meraniami	2,94 μ s
Ustálenie výstupu CNY70 pri zmene z 5 na 0 V	70 μ s
Ustálenie výstupu CNY70 pri zmene 0 V na 5 V	388 μ s
Ustálenie výstupu CNY70 pri zmene 0 V na 3 V	99 μ s
Doba medzi aktivovaním Enable a zmenou na výstupe demultiplexera	14,2 ns
Detekcia prekážky ^{*)}	
Doba jednej periódy generovaného signálu na vstupe IR LED	26 μ s
Frekvencia generovaného signálu	38,462 kHz
Doba trvania burstu (15 impulzov)	397 μ s
Doba trvania výstupného signálu	384 μ s
Posunutie začiatku výstupného signálu za začiatkom vstupného signálu	178 μ s
Doba merania pri nedetegovaní prekážky	720 μ s
Doba merania detegovania vzdialenej prekážky	1,98 ms
Doba merania detegovania stredne vzdialenej prekážky	4,48 ms
Doba merania detegovania blízkej prekážky	7 ms
Poznámky:	
*) Hodnoty platia pre <code>_delay_loop()</code> nastavený na hodnotu 35 pre obe polperiódy a 15 impulzov vstupného signálu	
Použité prístroje:	
Napájací zdroj	MW 9115GS
Osciloskop	Agilent 54624A

6.2 Spôľahlivosť

Senzory na sledovanie čiary boli odskúšané vo výškach 0, 3, 5 a 7 mm nad povrchom. Najlepšie vlastnosti dosahoval pri vzdialenosti 3 mm nad podložkou, pre ktorú boli optimalizované. Ako vyplýva z vynesenej závislosti (Obrázok 6.1) pre vzdialenosť 7 mm a viac je potrebné zvýšiť intenzitu emitovaného žiarenia.

Vystavenie optočlena priamemu osvetleniu 40 W žiarovky zo vzdialenosti 50 cm malo za následok otvorenie fototranzistora a na jeho výstupe bolo 50% napájacieho napätia. Toto značné rušenie sa už ale neuplatnilo pri bežnej prevádzke senzora na spodnej strane podvozku. Okolité osvetlenie aj pri zvýšenej intenzite vplývalo na vlastnosti senzorov len minimálne a to pri všetkých uskutočnených meraniach.

Meranie pomocou testovania logických úrovní prebehlo vo všetkých testoch s čiernou čiarou na bielom podklade bez problémov. V prípade A/D prevodníka sa prejavili drobné odchýlky u jednotlivých senzorov spôsobené menšou precíznosťou pri osadzovaní optočlenov do dosky plošných spojov. Po prepočte zmeraných hodnôt na napätie sa jednalo rádovo o nízke desiatky milivoltov, ktoré na správne vyhodnotenie nemali vplyv a senzory boli schopné rozoznať všetky testované typy povrchov spoľahlivo.



Obrázok 6.1: Závislosť výstupného napätia na type a vzdialenosti povrchu

Spoľahlivosť senzorov vyplýva z vlastností infračerveného žiarenia ako aj jednotlivých prvkov. Vo väčšine testovaných prípadov bola prekážka detegovaná, no vzhľadom na podstatné rozdiely v odrazivosti rôznych plôch nie je možné definovať presné vzdialenosti, platné pre všetky typy materiálov. Približne v 1 z 20 prípadov sa stalo, že prekážka senzorom nebola detegovaná pri prvom ale až pri druhom meraní. Vzhľadom na to, že tieto prípady sa vyskytli pri vzdialenejších prekážkach a robot je v prednej časti vybavený 3 senzormi, by nemala nastať situácia, keď by došlo ku kolízii s prekážkou. Zvýšenie spoľahlivosti je možné dosiahnuť znížením frekvencie generovaného signálu alebo opakovanými meraniami, čo má ale za následok predĺženie doby merania. Tento kompromis je nutné zvážiť v závislosti na rýchlosti akou sa robot pohybuje.

6.3 Energetická náročnosť

Nízka energetická náročnosť je dôležitým parametrom každého zariadenia napájaného z batérie. Preto bola uskutočnená séria meraní, ktorých cieľom je nie len oboznámiť užívateľa s konkrétnymi hodnotami ale zároveň mu majú umožniť efektívnejšie ovládanie sensorového systému tak aby bola výdrž batérií čo najdlhšia. Všetky hodnoty odberov prúdu (Tabuľka 6.2) sú okamžité hodnoty v čase spustenia sledovaného procesu. Priemerná spotreba je teda závislá predovšetkým na intervaloch v akých budú prebiehať merania a na využívaní úsporného režimu. Zatiaľ čo pripojením sensorov na sledovanie čiary sa odber prúdu až do doby aktivácie prakticky vôbec nezmenil, po pripojení každého senzora na detekciu prekážky sa zvýšil odoberaný prúd v Power Down móde približne o 1 mA. V ostatných typoch úsporného režimu bol rozdiel minimálny. Merania boli uskutočnené pri taktovacej frekvencii procesora 8 MHz. Pokiaľ pracuje procesor naprázdno platí, že s interným RC oscilátorom sa od 1 MHz smerom hore zvyšuje odoberaný prúd približne o 1 mA na každý MHz. Prúdový odber demultiplexera 74F138 pri odpojenom výstupe je 11,6 mA, možno ho znížiť vhodnou náhradou z úspornejších rád, avšak táto výmena nevyhnutne ovplyvní ďalšie parametre systému.

Tabuľka 6.2: Celkový odber prúdu pri rôznych procesoch

Odber bez pripojených sensorov ($U = 4,95\text{ V}$)	
Vypnutý úsporný režim	29,30 mA
Idle mode	23,91 mA
ADC noise	21,12 mA
Power Down	10,85 mA
Power Save	10,85 mA
Pripojené všetky senzory, neaktívne ($U = 4,95\text{ V}$)	
Vypnutý úsporný režim	31,23 mA
Idle mode	24,69 mA
ADC noise	21,77 mA
Power Down	16,42 mA
Jeden aktívny senzor na detekciu prekážky v rôznych režimoch ($U = 4,95\text{ V}$)^{*)}	
Vzdialená prekážka	61,29 mA
Stredne vzdialená prekážka	53,98 mA
Blízka prekážka	50,45 mA
Bočný senzor	60,89 mA
Jeden aktívny senzor na sledovanie čiary ($U = 4,95\text{ V}$)	
Jedna aktívna IR LED	47,5 mA
Poznámky:	
*) Jedná sa o maximálny odber prúdu pri $f = 0\text{ Hz}$	
Použité prístroje:	
Napájací zdroj	MW 9115GS
Ampérmeter	METEX M-3860D
Voltmeter	HC-DT860D

7 Záver

Cieľom bakalárskej práce bolo navrhnúť senzorový systém pre malého mobilného robota. Systém mal zahŕňať senzory na sledovanie čiary a detekciu prekážky. V práci sú stručne spracované teoretické poznatky nutné k pochopeniu uvedených základných princípov a zapojení.

V rámci projektu boli odskúšané viaceré možnosti zapojenia senzorov, zhodnotené ich možnosti, výhody a nevýhody a na základe získaných skúseností, bolo navrhnuté riešenie spĺňajúce najdôležitejšie kritériá pre tento typ zariadenia. Jedná sa predovšetkým o pomer spotreby, výkonu a spoľahlivosti. Navrhnuté zapojenie je napriek svojej hardwarovej jednoduchosti výkonným a univerzálnym riešením. Univerzálnosť je v tomto smere chápaná ako možnosť osadiť senzorový systém na väčšinu mobilných robotov plniacich úlohu, pre ktorú je systém navrhnutý. Systém je modulárny a je možné použitie aj s iným počtom pripojených senzorov. Senzorový systém bude pracovať rovnako spoľahlivo nezávisle na tom, či ním bude osadený robot s trojkolesovým podvozkom a diferenciálnym riadením, so štvorkolesovým Ackermanovým podvozkom prípadne iným typom. To je dané možnosťou riadiacej jednotky robota, zásadným spôsobom ovplyvniť väčšinu parametrov sensorového systému a zmeniť tak predvolené nastavenia dočasne po dobu pripojeného napájania, prípadne aj pre budúce použitie, kedy si mikroprocesor uloží potrebné premenné do internej pamäte EEPROM. Senzorový systém umožní na základe požiadavky riadiacej jednotky zaslanie a kompletné spracovanie dát riadiacou jednotkou robota a tým dáva priestor na využitie, niektorých senzorov pre iné účely, napríklad detekcia hrany stola a podobne.

Na sledovanie čiary boli vybrané reflexné optočleny CNY70 budené cez demultiplexer mikroprocesorom a ich výstup pripojený na port A mikroprocesora. Ten obsahuje zároveň 10bitový A/D prevodník, ktorý umožnil využiť pokročilé metódy detekcie čiary. Detekcia prekážky je riešená pomocou infračervenej LED diódy pripojenej k mikroprocesoru a budenej modulovaným signálom o frekvencii 38 kHz. Žiarenie odrazené od prekážky následne dopadá na detektor s integrovaným demodulátorom SFH5110 a jeho výstup je pripojený k mikroprocesoru. Pôvodne bol systém navrhnutý pre pracovný kmitočet 40 kHz, čo by zjednodušilo v prípade potreby náhradu optických senzorov za senzory ultrazvukové. Vzhľadom na to, že SFH5110 pracujúce na kmitočte 40 kHz sú v ČR dostupné iba na objednávku vo väčších množstvách, bolo od tohto zámeru upustené. Hlavným dôvodom pre výber optických senzorov a nie ultrazvukových boli podstatne dlhšia doba detekcie, problémy s detekciou prekážok v tesnej blízkosti robota a vyššie energetické nároky. Komunikácia medzi riadiacou jednotkou a senzorovým subsystémom prebieha pomocou zbernice TWI. K dispozícii sú aj viaceré druhy úsporného režimu. Tie je nutné voliť tak, aby nebola narušená činnosť systému. V prípade častých požiadaviek na meranie, by mohla nastať situácia, kedy sa systéme nestihne prebudíť z úsporného režimu. V takomto prípade je lepšie úsporný režim vypnúť. Bez ohľadu na toto nastavenie platí, že senzory, ktoré sa aktuálne nevyužívajú sú vypnuté. S ohľadom na spotrebu realizovaného modulu by bolo možné použiť nízko príkonovú verziu mikroprocesora ATmega16L a následne znížiť aj jeho pracovnú frekvenciu. Táto úprava by však mala význam iba v prípade náhrady fotodetektorov na detekciu prekážky za verziu pracujúcu s napájacím napätím 3,3 V. Tie sú ale v Českej republike ťažko dostupné a ich cena je približne 10 násobne vyššia v porovnaní s použitými

SFH5110. O niekoľko miliampérov je možné znížiť spotrebu vhodnou náhradou demultiplexera 74F138.

Z výsledkov meraní vyplýva, že senzorový systém na detekciu čiary umožňuje spoľahlivú funkciu. Jeho limitom je doba ustálenia fototranzistorov v reflexných optočlenoch CNY70, ktorá je maximálne 70 μ s. Tento čas je daný pre prípad zmeny výstupného napätia z 5 V na 0 V, čo v reálnej situácii nenastane a preto je možné tento čas riadiacou jednotkou znížiť. V režime s A/D prevodníkom doba ustálenia nie je kritická a pri testoch bolo možné spoľahlivo rozoznať čiaru aj pri zmene tohto parametra na 10 μ s. Jeden cyklus detekcie čiary pri prednastavených parametroch s použitím siedmich senzorov trvá 2,06 ms s A/D prevodníkom a 587 μ s v režime s detekciou logických úrovní.

Na základe uskutočnených meraní možno konštatovať, že systém detekcie prekážok umožňuje spoľahlivú identifikáciu objektov v blízkom okolí robota. Spoľahlivosť je zároveň daná typom povrchu prekážky a jej natočením. Prípadné chyby merania spôsobené rušením sú kompenzované obslužným softwarom. Doba merania je rádovo jednotky až desiatky milisekúnd v závislosti na nastavených parametroch.

Aj napriek všetkým funkciám, ktoré navrhnutý a realizovaný modul ponúka, jeho možnosti zďaleka nie sú vyčerpané. Stále je dostatok priestoru na predovšetkým softwarové vylepšenia ale aj na niekoľko drobných hardwarových úprav, ktoré by ako sa ukázalo po vyrobení prototypu mohli znížiť odber, zmenšiť rozmery alebo zlepšiť jeho modulárnosť samozrejme za cenu zvýšenia nákladov na jeho výrobu.

Zoznam použitej literatúry

1. **Pelant, Ivan a kolektív.** *Fyzikální praktikum III - Optika*. Praha : Matfyzpress, 2005. ISBN 80-86732-67-3.
2. **Martinek, Radislav.** *Senzory v průmyslové praxi*. Praha : BEN - technická literatura, 2004. ISBN 80-7300-114-4.
3. **Fukátko, Tomáš.** *Detekce a měření různých druhů záření*. Praha : BEN - technická literatura, 2007. ISBN 978-80-7300-193-3.
4. **Atmel Corporation.** Atmel Products. *Datasheets*. [Online] Rev. 2466R-06/08 345, Jún 2008. Katalógové listy ATmega16. http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc2466.pdf.
5. **Dúbravský, J. a Tesár, R.** CCD snímač čiary. [Online] <http://www.robotika.sk/projects/sensorline/snimac.php>.
6. **Novák, Petr.** *Mobilní roboty - pohony, senzory, řízení*. Praha : BEN - technická literatura, 2005. ISBN 80-7300-141-1.
7. **OSRAM Opto Semiconductors GmbH.** OSRAM Opto Semiconductors. *Product Catalog*. [Online] 6. 10. 2008. [Dátum: 18. 12. 2008.] Katalógové listy a aplikačné poznámky k obvodu SFH5110. <http://catalog.osram-os.com>.
8. **SHARP Electronics Corporation.** Sharp. *Distance measuring*. [Online] [Dátum: 1. 11. 2008.] Katalógové listy a aplikačné poznámky optoelektronických senzorov. http://www.sharpsme.com/Page.aspx/europe/en/b25198ae-eeda-458b-a14f-92e2bd34f1c7/Distance_Measuring/.
9. **Devantech Ltd.** Ultrasonic Rangers. [Online] Technická špecifikácia ultrazvukových senzorov. www.robot-electronics.co.uk.
10. **NXP Semiconductors.** I2C licensing information. *I2C BUS specification and user manual*. [Online] Rev. 03, 19. 6. 2007. [Dátum: 23. 12. 2008.] http://www.nxp.com/acrobat_download/usermanuals/UM10204_3.pdf.

Zoznam použitých skratiek

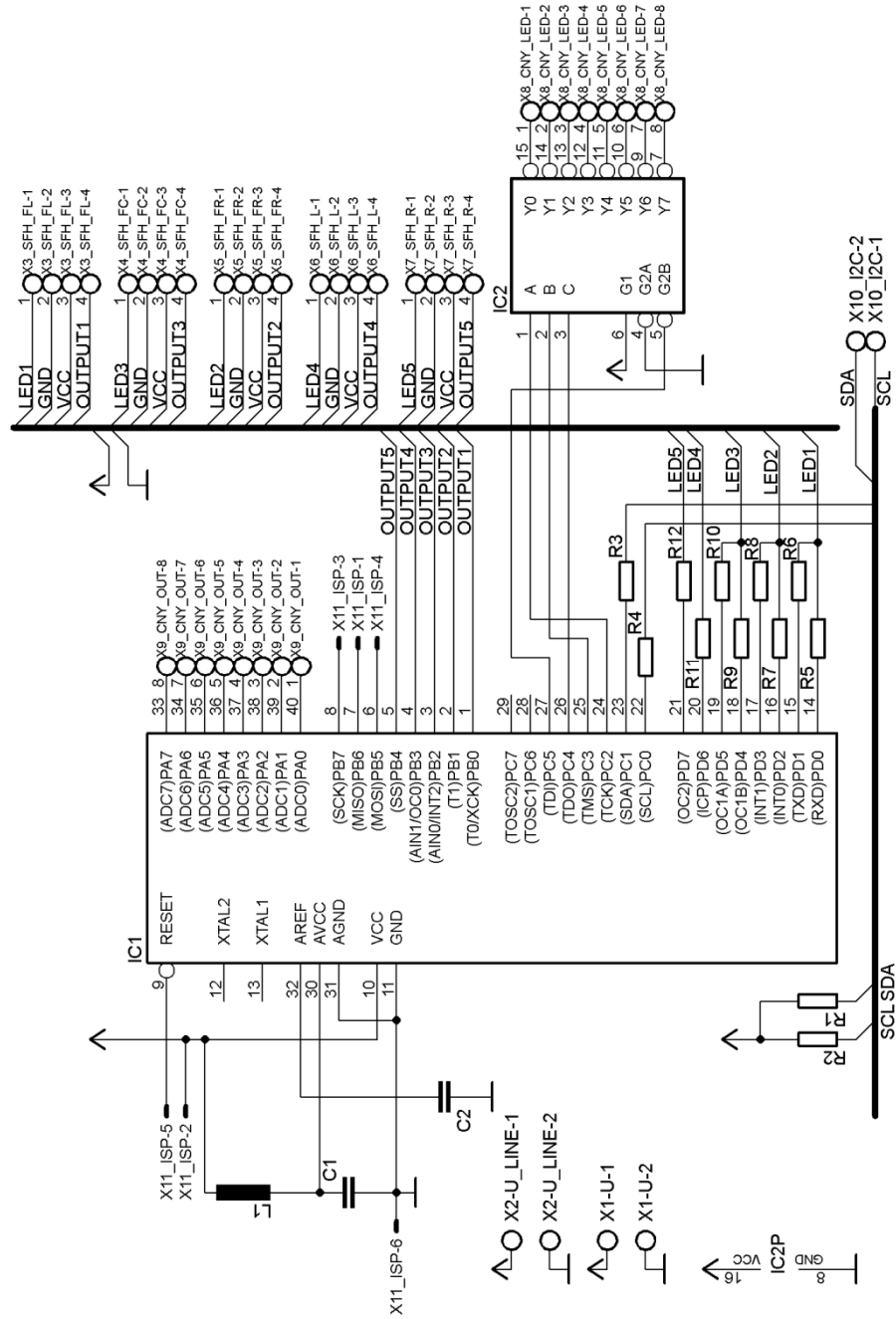
Skratka	Význam	Popis
A/D	Analog to Digital	Analógovo-digitálny (prevodník), obvod premieňajúci spojité signál na digitálny
ACK	Acknowledge	Potvrdzovací bit
ADC	Analog to Digital Converter	Analógovo-digitálny prevodník, obvod premieňajúci spojité signál na digitálny
AGC	Automatic Gain Control	Samočinné riadenie zisku (zosilňovača)
ANN	Artificial Neural Network	Umelá neurónová sieť
CCD	Charge Coupled Device	Nábojovo viazaná súčiastka, jedná sa o zariadenie používané na snímanie obrazu
CLK	Clock	Hodinový signál, zvyčajne slúži na synchronizáciu prenosu pri sekvenčných obvodoch alebo na sériovej zbernici
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor	Technológia výroby integrovaných obvodov
D/A	Digital to Analog	Digitálno-analógový (prevodník), obvod premieňajúci digitálny signál na spojité
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory	Pamäť typu ROM s možnosťou elektrického mazania
GPS	Global Positioning System	Globálny navigačný systém slúžiaci na presné zistenie polohy
I2C	Inter-Integrated Circuit	Dvojvodičová zbernica určená na komunikáciu integrovaných obvodov v elektronických zariadeniach
IR	Infrared	Infračervený, označuje zariadenie (fototranzistor, fotodiódu, LED diódu a podobne) pracujúce s infračerveným žiarením
LED	Light-emitting diode	Dióda vyžarujúca svetlo
PSD	Position sensitive detector	Polohovo citlivý detektor, optoelektronický senzor, ktorého výstup nie je závislý na intenzite signálu ale na mieste dopadu svetelného lúča
PWM	Pulse-Width Modulation	Pulzne šítková modulácia
S/H	Sample and Hold	Analógové napätie sa podrží konštantné na krátku dobu počas spracovávania iným obvodom
SCL	Synchronous Clock	Synchronizačný vodič na zbernici I2C
SDA	Synchronous Data	Dátový vodič na zbernici I2C
TTL	Transistor-Transistor Logic	Tranzistorovo tranzistorová logika, technológia výroby integrovaných obvodov
TWI	Two Wire Interface	Názov pre zbernicu I2C používaný firmou Atmel Corporation
UART	Universal Asynchronous Receiver/Transmitter	Univerzálny asynchrónny prijímač/vysielač

Zoznam príloh

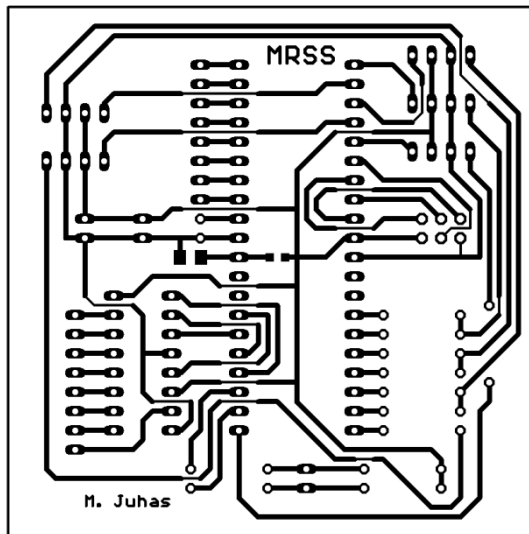
A	Výkresová dokumentácia	42
A.1	Schéma zapojenia riadiacej časti.....	42
A.2	Doska plošného spoja riadiacej časti.....	43
A.3	Schéma zapojenia senzorov na sledovanie čiary	44
A.4	Doska plošného spoja senzorov na sledovanie čiary.....	45
A.5	Schéma zapojenia senzora na detekciu prekážky	46
A.6	Doska plošného spoja senzora na detekciu prekážky.....	47
B	Zoznam súčiastok.....	48
C	Zoznam príkazov.....	49
D	Fotodokumentácia	50
E	Obsah DVD nosiča.....	51

A Výkresová dokumentácia

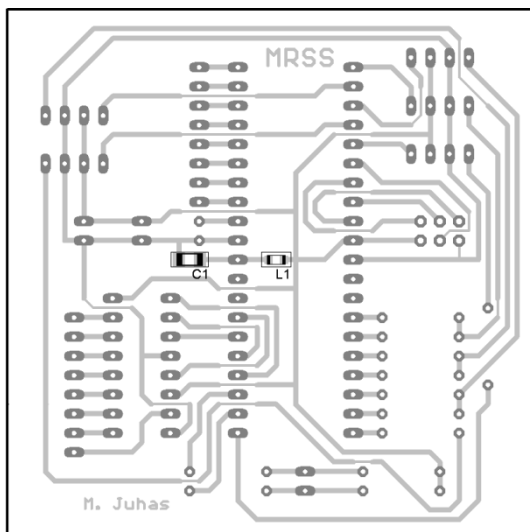
A.1 Schéma zapojenia riadiacej časti



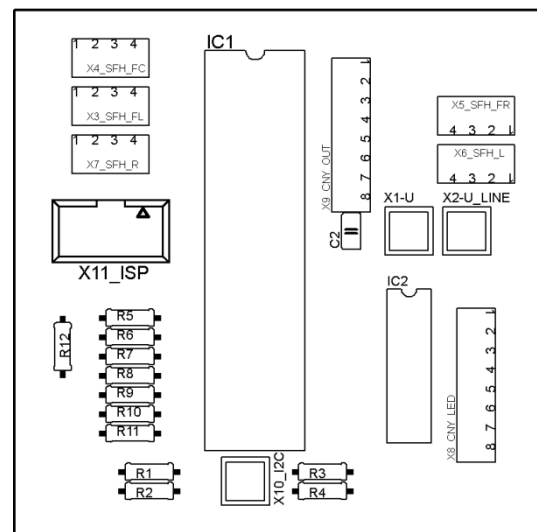
A.2 Doska plošného spoja riadiacej časti



Doska plošného spoja 69,85 x 69,85 mm

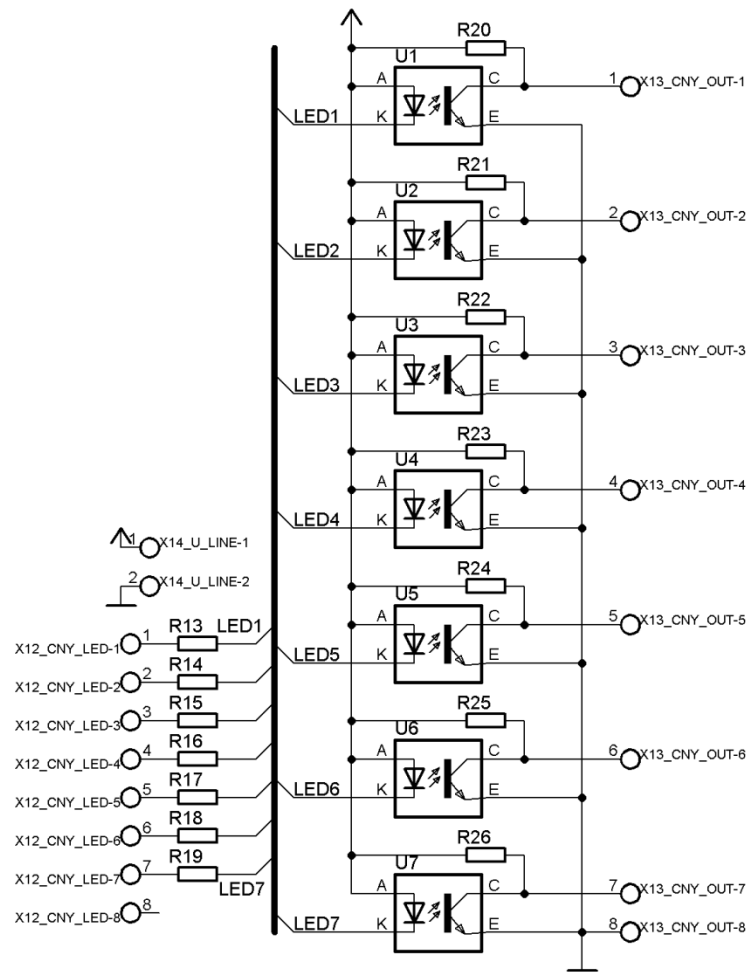


Osadzovací plán – strana spojov

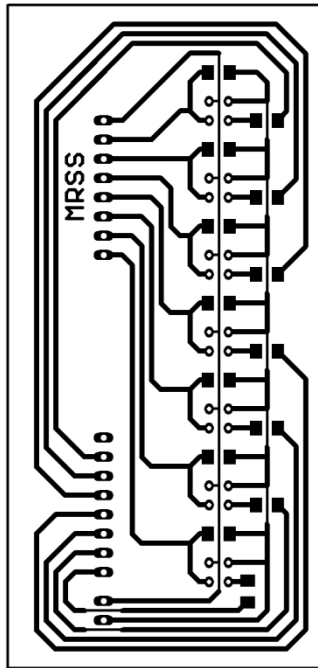


Osadzovací plán – strana súčiastok

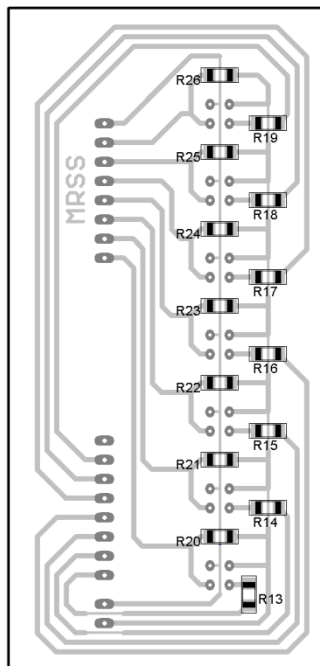
A.3 Schéma zapojenia senzorov na sledovanie čiary



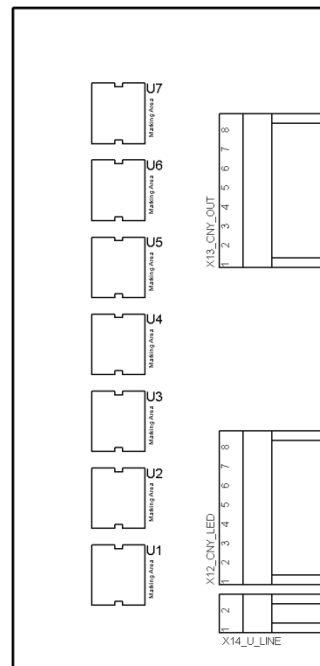
A.4 Doska plošného spoja senzorov na sledovanie čiar



Doska plošného spoja 41,91 x 87,63 mm

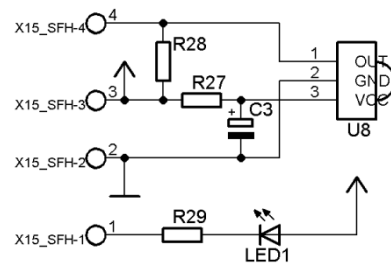


Osadzovací plán – strana spojov

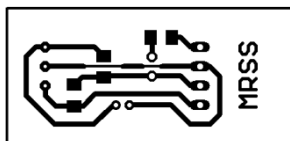


Osadzovací plán – strana súčiastok

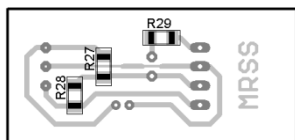
A.5 Schéma zapojenia senzora na detekciu prekážky



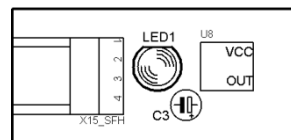
A.6 Doska plošného spoja senzora na detekciu prekážky



Doska plošného spoja 38,1 x 17,78 mm



Osadzovací plán – strana spojov



Osadzovací plán – strana súčiastok

B Zoznam súčiastok

Označenie	Hodnota	Púzdro
C1, C2	100 nF	C1206
C3	4,7 μ F/35 V	miniaturny
IC1	ATmega16-PU	DIL40
IC2	74F138	DIL16
L1	10 μ H	L2012C
LED1	LD274-3	
R1, R2 – <i>neosadené</i>	4,7 k	
R3, R4, R6, R8, R10	220 Ω	
R5, R7, R9	300 Ω	
R11, R12	130 Ω	
R13-R19	160 Ω	R1206
R20-R26, R28	20 k	R1206
R27, R29	82 Ω	R1206
U1-U7	CNY70	
U8	SFH5110-38	
X1, X2, X10	PSH02-02P	
X3-X7	PSH02-04P	
X8, X9	PSH02-08P	
X11	PFL06	
X12, X13	PSH02-08W	
X14	PSH02-02W	
X15	PSH02-04W	

Poznámka: Konektory na kábel pozostávajú zo zásuvky PFH02-02P, PFH02-04P, PFH02-08P a vložky PFF02-01FG TAPE.

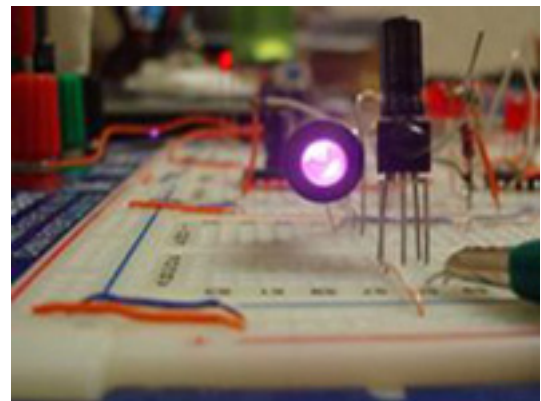
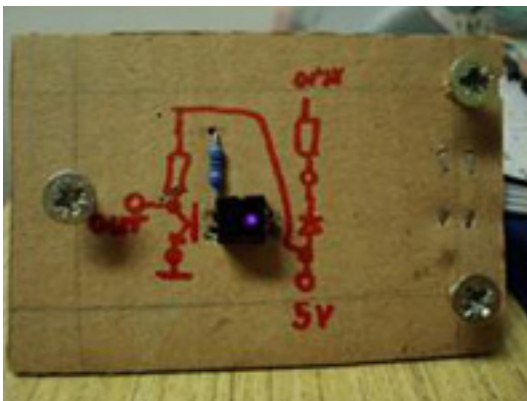
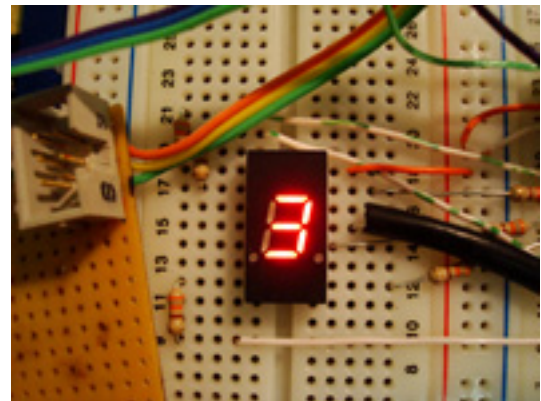
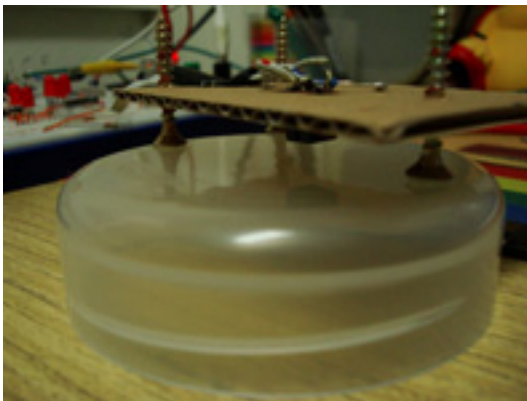
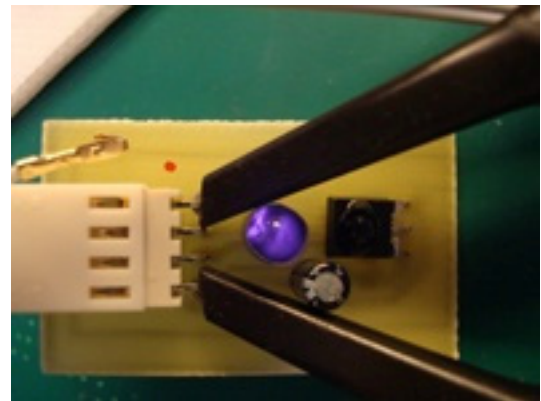
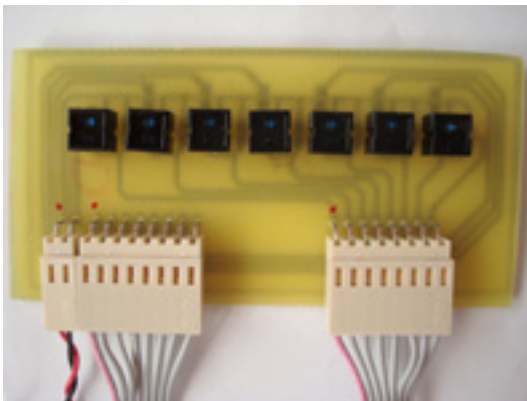
C Zoznam príkazov

00 - Všeobecné			
Kód	Popis	Hodnoty	Predvolené
00001	Zmena Slave adresy	0b0XXXXXXXX	0x4C
00010	Typ úsporného režimu	0b00000XXX	0x07
	000 – Idle		
	001 – ADC Noise		
	010 – Power Down		
	111 – Vypnutý		

01 – Sledovanie čiary			
Kód	Popis	Hodnoty	Predvolené
00100	Systém spracovania údajov	0b000000XX	0x00
	00 – ako treba zmeniť smer		
	01 – logické úrovne v spoločnom byte		
	10 – 8bitové dáta		
	11 – 10bitové dáta		
01000	Typ merania	0b000000XX	0x00
	00 – systém vyberie vhodnejší spôsob		
	01 – A/D prevodník		
	10 – logické úrovne		
10001	Zistenie hrúbky čiary	-	-
10010	Zistenie počtu pripojených senzorov	-	-
10011	Nastavenie počtu senzorov, 1 až 8	0b0000XXXX	0x07
10100	Odtieň čiary MSB	0b000000XX	0x03
10101	Odtieň čiary LSB	0bXXXXXXXXXX	0xDF
10110	Odtieň podložky MSB	0b000000XX	0x00
10111	Odtieň podložky LSB	0bXXXXXXXXXX	0x20
11000	Čiara je tmavšia ako podložka	0b0000000X	0x01
11001	Doba ustálenia výstupu senzorov	0bXXXXXXXXXX	0xA0

10 – Detekcia prekážky			
Kód	Popis	Hodnoty	Predvolené
00001	Režim merania	0b000000XX	01
	01 – Sekvenčný režim		
	10 – Rýchla detekcia		
	11 – 1x IR LED, 3x SFH5110		
01000	Iba predné senzory	-	-
01001	Iba bočné senzory	-	-
01010	Iba pravý senzor	-	-
01011	Iba ľavý senzor	-	-
01100	Všetky senzory	-	-
10001	Doba 1. polperiódy generovaného signálu	0bXXXXXXXXXX	0x23
10010	Doba 2. polperiódy generovaného signálu	0bXXXXXXXXXX	0x23
10011	Počet impulzov generovaného signálu	0bXXXXXXXXXX	0x0F

D Fotodokumentácia



E Obsah DVD nosiča

\Document		
BBCE.pdf	Text bakalárskej práce	<i>PDF v1.4</i>
\PCB		
line_following.brd	Doska plošných spojov senzorov na sledovanie čiary	<i>Eagle 5.4.0</i>
line_following.pdf	Vygenerované podklady pre výrobu DPS	<i>PDF v1.4</i>
line_following.sch	Schéma zapojenia senzorov na sledovanie čiary	<i>Eagle 5.4.0</i>
line_following.txt	Zoznam súčiastok pre senzory na sledovanie čiary	<i>ANSI</i>
main.brd	Doska plošných spojov riadiacej časti	<i>Eagle 5.4.0</i>
main.pdf	Vygenerované podklady pre výrobu DPS	<i>PDF v1.4</i>
main.sch	Schéma zapojenia senzorov na sledovanie čiary	<i>Eagle 5.4.0</i>
main.txt	Zoznam súčiastok pre riadiacu časť	<i>PDF v1.4</i>
obstacle.brd	Doska plošných spojov senzorov na detekciu prekážky	<i>Eagle 5.4.0</i>
obstacle.pdf	Vygenerované podklady pre výrobu DPS	<i>PDF v1.4</i>
obstacle.sch	Schéma zapojenia senzorov na detekciu prekážky	<i>Eagle 5.4.0</i>
obstacle.txt	Zoznam súčiastok pre senzory na detekciu prekážky	<i>ANSI</i>
\Sources\Master		
master.c	Knižnica pre ovládanie senzorov riadiacou jednotkou	<i>AVR-GCC</i>
master.h	Hlavičkový súbor knižnice pre ovládanie senzorov	<i>AVR-GCC</i>
\Sources\Sensors		
main.c	Zdrojový kód sensorového subsystému	<i>AVR-GCC</i>
sensors.c	Knižnica funkcií pre sensorový subsystém	<i>AVR-GCC</i>
sensors.h	Hlavičkový súbor pre sensorový subsystém	<i>AVR-GCC</i>