



České vysoké učení technické v Praze

Fakulta elektotechnická

Katedra řídicí techniky K-13135

Sensorické řešení zabraňující pádu z vyvýšeného místa
pro robotickou platformu mBot

Sensory solution to prevent falling from an elevated
position for the mBot robotic platform

Bakalářská práce

Študijný program: Kybernetika a robotika

Vedúci práce: Ing. Jan Havlík Ph.D.

Marek Rušin

Praha 2021

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Rušin** Jméno: **Marek** Osobní číslo: **483535**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra řídicí techniky**
Studijní program: **Kybernetika a robotika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Sensorické řešení zabráňující pádu z vyvýšeného místa pro robotickou platformu mBot

Název bakalářské práce anglicky:

Sensory solution to prevent falling from an elevated position for the mBot robotic platform

Pokyny pro vypracování:

- 1) Seznamte se s technickým řešením robotické platformy mBot, která je vybavena jednoduchým podvozkem a řídicí elektronikou na bázi Arduino Uno s procesorem ATmega 328.
- 2) Navrhněte a realizujte řídicí elektroniku a osazení robota sensory tak, aby byl při pohybu schopen samočinně předejít pádu z vyvýšeného místa.
- 3) Experimentálně ověřte realizované řešení.

Seznam doporučené literatury:

- [1] mBot documentation. Online: <https://www.makeblock.com/support/ps-mbot> [26. 1. 2020].
- [2] Trobaugh, J. J.: Winning Design! LEGO MINDSTORMS NXT Design Patterns for Fun and Competition. Apress, Berkeley, CA, 2010. ISBN 978-1-4302-2965-0
- [3] Pérula-Martínez, R., García-Haro, J.M., Balaguer, C. et al.: Developing Educational Printable Robots to Motivate University Students Using Open Source Technologies. J Intell Robot Syst (2016) 81: 25

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Jan Havlík, Ph.D., katedra teorie obvodů FEL

Jméno a pracoviště druhého(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **12.02.2021**

Termín odevzdání bakalářské práce: _____

Platnost zadání bakalářské práce:

do konce letního semestru 2021/2022

Ing. Jan Havlík, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

prof. Ing. Michael Šebek, DrSc.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Vyhlásenie

Vyhlasujem, že som predloženú prácu vypracoval samostatne a že som uviedol všetky použité informačné zdroje v súlade s Metodickým pokynom o dodržiavaní etických princípov pri príprave vysokoškolských prác.

V Prahe dňa 21.5. 2021

Pod'akovanie

Touto cestou by som sa chcel poďakovať vedúcemu bakalárskej práce Ing. Janovi Havlíkovi, Ph.D. za jeho rady a usmernenia pri vypracovaní tejto práce. Taktiež by som rád poďakoval svojej rodine, kolegom a známym za ich podporu.

Abstrakt

Robotické stavebnice na bázi Arduino alebo Raspberry Pi sa stávajú čoraz viac populárnejšími, platforma mBot je založená práve na bázi Arduino. Cieľom bakalárskej práce je navrhnúť senzorické riešenie pre robotickú platformu mBot, ktorá zabráni pádu robota pri pohybe po vyvýšenom mieste. V práci je kľúčové nájsť vhodný druh senzoru, ktorý by pomohol predísť pádu robota z vyvýšeného miesta. Takisto je potrebné vybrať vhodnú riadiacu elektroniku pre spracovanie nameraných dát a náležitú komunikáciu medzi vyhotovenou elektronikou a riadiacou doskou mBota. Ďalšími faktormi, ktoré majú vplyv na výsledné riešenie, sú cenová dostupnosť použitých komponentov a nízka výpočtová náročnosť pri ovládaní pohybu robota.

S použitím infračervených proximity sensorov, laserových sensorov vzdialenosti, dosky Arduino Nano pre spracovanie zmeraných dát a výberom komunikácie po I2C zbernici sa požiadavky podarilo splniť. Zhotovené senzorové moduly dokážu s vysokou pravdepodobnosťou detekovať okraj povrchu a včas poskytnúť informácie na vykonanie korekcie pohybu robota.

Kľúčové slová: mBot, Arduino, robot, pohyb, infračervený proximity senzor, laserový senzor vzdialenosti, detekovanie okraja

Abstract

Robotic kits based on Arduino or Raspberry Pi are becoming more and more popular, the mBot platform is based on Arduino. The aim of the bachelor's thesis is to design a sensory solution for the robotic platform mBot, which prevents the robots from falling when moving on an elevated place. In the work, it is crucial to find a suitable type of sensor that would help prevent the robot from falling from an elevated position. It is also necessary to select a suitable control electronics for processing the measured data and proper communication between the manufactured electronics and the mBot control board. Important factors for the final solution are the affordability of the used components and the low computational complexity in controlling the robot's movement.

Using infrared proximity sensors, laser distance sensors, Arduino Nano board to process the measured data and selected I2C bus communication, the requirements were met. The manufactured sensor modules work with a high probability of detecting the edge of the surface and provide information in time to perform the correction of the robot's movement.

Keywords: mBot, Arduino, robot, movement, infrared proximity sensor, laser distance sensor, edge detection

Obsah

1	Úvod.....	8
2	Platforma mBot	9
2.1	Hardware platformy	9
2.2	Software platformy	10
3	Výber vhodného senzoru vzdialenosti	11
3.1	Ultrazvukový senzor vzdialenosti	11
3.2	Infračervený proximity senzor	12
3.3	Laserový senzor vzdialenosti	13
3.4	Zhodnotenie výberu senzorov	14
4	Úprava infračerveného proximity senzoru	15
4.1	Modul TCRT 5 000	15
4.2	Potlačenie okolitého infračerveného rušenia.....	16
4.3	Návrh zapojenia infračerveného senzoru.....	17
5	Realizácia samostatných senzorových modulov	18
5.1	Návrh a realizácia dosiek plošných spojov	18
5.2	Programovanie senzorových modulov	20
5.3	Komunikácia na zbernici I2C	23
6	Výsledky práce	24
6.1	Pohyb na platforme s vysokým prevýšením	24
6.2	Pohyb na platforme s nízkym prevýšením.....	25
6.3	Pohyb na povrchu tvoreného odlišnými materiálmi.....	25
6.4	Meranie vzdialenosti od okraja povrchu pri detekovaní prekážky	26
6.5	Diskusia výsledkov.....	27
7	Záver	28
A	Schéma dosky mCore	31
B	Schéma zapojenia infračerveného senzorového modulu	32
C	Doska plošných spojov infračerveného senzorového modulu	33
D	Schéma zapojenia laserového senzorového modulu	34
E	Doska plošných spojov laserového senzorového modulu.....	35
F	Zoznam použitých súčiastok	36
G	Fotografie robota s výslednými sezorovými modulmi	37

Zoznam obrázkov

Obrázok 2.1: Riadiaca doska mCore [5]	10
Obrázok 3.1: Schéma zapojenia použitého infračerveného senzoru [9]	12
Obrázok 3.2: Schéma zapojenia dosky so senzorom VL53L0X [11]	14
Obrázok 4.1: Závislosť kolektorového prúdu na prúde pretekajúcim infračervenou diódou ..	15
Obrázok 4.2: Závislosť relatívneho kolektorového prúdu od vzdialenosti	15
Obrázok 4.3: Priebehy výstupných hodnôt senzoru	16
Obrázok 4.4: Schéma zapojenia upraveného infračerveného senzoru.....	17
Obrázok 5.1: Vzdialenosti senzorov vzhľadom ku konštrukcii mBota	19
Obrázok A.1: Schéma dosky mCore [5]	31
Obrázok B.1: Schéma zapojenia infračerveného sensorového modulu	32
Obrázok C.1: Doska plošných spojov infračerveného sensorového modulu	33
Obrázok D.1: Schéma zapojenia laserového sensorového modulu	34
Obrázok E.1: Doska plošných spojov laserového sensorového modulu	35
Obrázok G.1: Fotografia robota so zapojeným infračerveným sensorovým modulom.....	37
Obrázok G.2: Fotografia robota so zapojeným laserovým sensorovým modulom	37

Zoznam tabuliek

Tabuľka 2.1: Prehľad základných mechanických súčasti stavebnice mBot	9
Tabuľka 2.2: Prehľad elektronických súčastí stavebnice mBot.....	9
Tabuľka 5.1: Prehľad použitých základných premenných v programe pre Arduino Nano	20
Tabuľka 5.2: Prehľad funkcií implementovaných pre Arduino Nano	20
Tabuľka 5.3: Výber výkonov pre motory na základe údajov zo senzorov	21
Tabuľka 5.4: Použité funkcie pre komunikáciu s laserovými senzormi.....	23
Tabuľka 6.1: Záznam vykonaných korekcií pohybu robota pri vysokom prevýšení	24
Tabuľka 6.2: Záznam vykonaných korekcií pohybu robota pri nízkom prevýšení	25
Tabuľka 6.3: Záznam vykonaných korekcií pri pohybe robota na rôznych povrchoch	25
Tabuľka 6.4: Závislosť vzdialenosti od okraja povrchu na výkone motorov	26
Tabuľka F.1: Zoznam použitých súčiastok	36

1 Úvod

Robotika sa postupne stáva súčasťou každodenného života ľudí, preto je dôležité, aby sa s jej základnými princípmi mohla zoznámiť aj laická verejnosť. Vzdelávanie v oblasti robotiky sa tak začína zaraďovať medzi pomerne zaujímavé odvetvia. Na trhu sa v tejto oblasti presadila najmä robotická stavebnica Lego Mindstorms. Cena tejto stavebnice zostáva v súčasnosti stále pomerne vysoká, preto na popularite začali naberať stavebnice využívajúce platformy Arduino či Raspberry Pi. Jedným z projektov využívajúcich platformy Arduino je napr. Developing Educational Printable Robots to Motivate University Students Using Open Source Technologies [1]. V projekte bol vytvorený cenovo dostupný robot, ktorého mechanické súčasti možno vytlačiť na 3D tlačiarňi.

Podobne aj stavebnica mBot od spoločnosti Makeblock využíva platformu Arduino. Štandardne stavebnica nedisponuje sensorovým príslušenstvom, ktoré by umožňovalo bezpečný pohyb robota po vyvýšenom povrchu. Cieľom tejto práce je zhodnotiť, ktoré komerčne dostupné druhy sensorov sú najvhodnejšie pre detekovanie prekážky pri veľkom prevýšení. V práci je potrebné navrhnuť a realizovať sensorové moduly, ktoré možno jednoducho pripojiť k stavebnici, a zároveň umožnia bezpečný pohyb robota po vyvýšenom povrchu.

2 Platforma mBot

Kapitola sa zaoberá základným opisom platformy mBot a riadiacej dosky mCore. Ďalej je v kapitole uvedený prehľad niektorých údajov o hardware a software, ktoré sú nutné pre potreby práce.

Platforma mBot je vzdelávací robot pre začiatočníkov v oblasti robotiky. Jej podstatou je pochopiť fungovanie robotických strojov a elektrických súčiastok, osvojiť si základy blokového programovania a rozvinúť logické myslenie a návrhárske schopnosti. Platforma mBot je produktom spoločnosti Makeblock a je dostupná pod oficiálnym názvom mBot, Educational Robot Kit [2]. V súčasnosti sa cena stavebnice mBot v českých obchodoch pohybuje okolo 2800 Kč. Pre realizáciu práce bola už zhotovená stavebnica mBot V 1.1 poskytnutá vedúcim práce.

2.1 Hardware platformy

Stavebnica mBot obsahuje nasledujúce mechanické súčasti: [3]

Názov komponentu	Počet
Hliníková konštrukcia	1
Násada na uchopenie riadiacej dosky	4
Hnacie koleso	2
Jednosmerný motor s uhlovou prevodovkou	2
Držiak na pripojenie štyroch AA batérii	1
Koleso otočné v pozdĺžnom smere	1

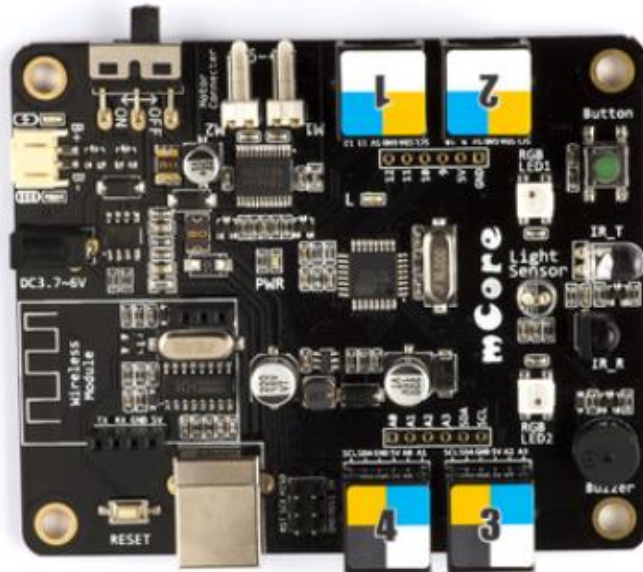
Tabuľka 2.1: Prehľad základných mechanických súčasti stavebnice mBot

Ďalej stavebnica obsahuje nasledujúce elektronické súčasti:

Názov komponentu	Počet
Riadiaca doska mCore	1
Bluetooth modul	1
Ultrazvukový senzor	1
Infračervený diaľkový ovládač	1
Infračervený senzor na sledovanie čiary	1

Tabuľka 2.2: Prehľad elektronických súčasti stavebnice mBot

Stavebnica mBot je riadená prostredníctvom dosky mCore, ktorej návrh vychádza z dosky Arduino Uno. Na prepojenie dosky mCore s počítačom slúži konektor USB, pre napájanie dvoch motorov sú vyhradené konektory JST. Ďalej doska disponuje štyrmi konektormi RJ25 na pripojenie senzorov a iných periférií. Jednotlivé konektory RJ25 majú na svojej hornej časti štítkok, ktorý farebne označuje, aký typ periférie je možné na daný konektor pripojiť. Každý konektor poskytuje napájanie 5V, dátový a hodinový pin zbernice I2C. Ostávajúce dva piny na každom konektore majú buď digitálne alebo analógové vstupy a výstupy, v závislosti od označenia konektora [4]. Doska má v sebe zabudované ďalšie programovateľné periférie, ako napríklad bzučiak alebo dve RGB LED.



Obrázok 2.1: Riadiaca doska mCore [5]

2.2 Software platformy

Z výroby je do riadiacej dosky mCore nahraný firmware, ktorý umožňuje bezdrôtovú komunikáciu s mobilným telefónom prostredníctvom rozhrania Bluetooth. Po stiahnutí mobilnej aplikácie od výrobcu je možné ovládať niektoré základné súčasti a funkcionality robota [3].

Výrobca ponúka dva spôsoby, ako programovať dosku mCore. Prvý spôsob používa grafické vývojové prostredie mBlock, ktoré vychádza z programovacieho jazyka Scratch (program na výuku algoritmizácie). Druhým spôsobom je programovanie vo vývojovom prostredí Arduino IDE, ktoré je založené na programovacom jazyku C. V tejto práci bol vybraný druhý spôsob programovania s využitím oficiálnej knižnice k robotu mBot [6].

3 Výber vhodného senzoru vzdialenosti

Kapitola sa zaoberá výberom vhodných druhov senzorov vzdialenosti, ktoré budú slúžiť pre zisťovanie prítomnosti povrchu a detekovanie okraja povrchu. U testovaných druhov sa nachádza aj popis, ako prebieha meranie s daným senzorom. Pri každom z uvedených senzorov sú uvedené ich výhody a nevýhody, podľa ktorých sa posudzovala ich vhodnosť pri výslednom návrhu senzorových modulov. V závere kapitoly sa nachádza odôvodnenie výberu najvhodnejších druhov senzorov.

3.1 Ultrazvukový senzor vzdialenosti

Ultrazvukové senzory patria medzi populárne druhy senzorov používanými pre bezkontaktné meranie vzdialenosti. Konkrétne pri návrhu senzorového modulu bol použitý typ HC – SR04.

Senzor poskytuje informáciu mikrokontroléru o časovom intervale medzi vyslaním a prijatím ultrazvukových pulzov (princíp Time of Flight). Pre spustenie merania vzdialenosti je najprv potrebné ultrazvukový senzor vybudíť pulzom o dĺžke aspoň 10 μ s na vstupnom pine Trigger. Následne senzor odošle osem ultrazvukových pulzov s frekvenciou 40 kHz a nastaví napätie na výstupnom pine Echo na hodnotu logickej jednotky. Ak prijímač zachytí prvú odrazenú ultrazvukovú vlnu, výstupné napätie na pine Echo nadobudne hodnoty logickej nuly. Môže sa stať, že prijímač nezachytí odrazené vlny. V takom prípade sa výstup senzora nastaví na logickú nulu po 30 ms [7]. Úlohou mikrokontroléru pri zisťovaní vzdialenosti je merať dobu trvania pulzu na výstupe. Doba trvania pulzu následne pomocou jednoduchého výpočtu umožní zistiť vzdialenosť medzi objektom a senzorom. Senzor dokáže merať vzdialenosť v rozmedzí 2 až 400 cm [8].

Značnou výhodou použitia ultrazvukových senzorov je ich odolnosť voči rušivým vplyvom prostredia. Senzor tak nevyžaduje dodatočný hardware a software úpravy napr. v prostredí s vysokým infračerveným rušením. Taktiež rôzne parametre ako farba alebo materiál neovplyvňujú výsledky merania pri použití tohto senzora. Samozrejme senzor nemôže byť použitý na meranie vzdialenosti od predmetu, ktorého povrch pohlcuje ultrazvukové vlny. Ďalšou výhodou je priaznivá cena u uvedeného modelu senzora.

Hlavnou nevýhodou použitého ultrazvukového senzora je jeho mierne oneskorenie pri náhlej zmene vzdialenosti. Senzor vo väčšine prípadov neskoro zareagoval na zmenu vzdialenosti od povrchu pri pohybe takmer rovnobežným s okrajom povrchu, čo môže mať za následok zapadnutie niektorého z hnacích kolies robota. Ďalšou zistenou nevýhodou ultrazvukového senzora bolo kolísanie nameraných hodnôt vzdialenosti spôsobené nepresnosťou merania. K falošnému detekovaniu prekážky dochádzalo v aplikáciách, kde bol výškový rozdiel medzi povrchom a prekážkou niekoľko centimetrov, a kde sa požadovalo pomerne presné rozlíšenie senzoru. Počas chodu robota jeden z ultrazvukových senzorov často zaznamenal hodnotu vzdialenosti, ktorá neodpovedala realite. Zistená hodnota vzdialenosti dosahovala takmer maximálne hodnoty, ktoré senzor dokáže zaznamenať. Senzor bol pri tom umiestnený približne vo výške 6 cm od povrchu.

Presnosť merania vzdialenosti je možné zvýšiť približným výpočtom rýchlosti zvuku pomocou vzťahu

$$v = 331,57 + 0,607t, \quad (3.1)$$

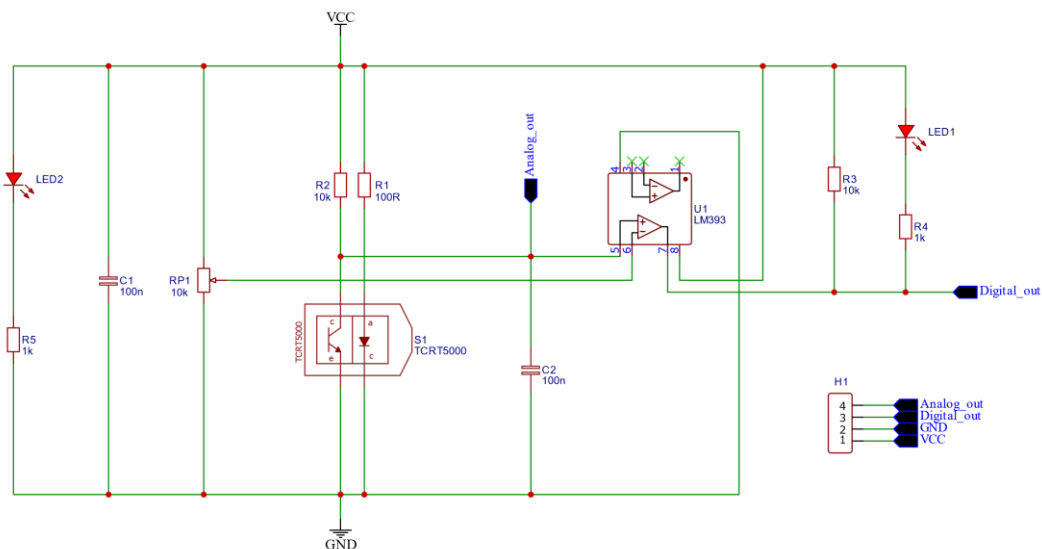
kde t je teplota prostredia v stupňoch Celzia. To by však vyžadovalo použitie senzoru teploty. Robustné rozmery ultrazvukového senzoru patria medzi ďalšie nevýhody.

3.2 Infračervený proximity senzor

Infračervený proximity senzor bol zvolený ako druhý typ senzoru na určovanie prítomnosti povrchu. Senzor používa modul TCRT 5 000 a niekoľko komplementárnych elektronických súčiastok. Podrobnejší popis modulu TCRT 5000 sa nachádza v nasledujúcej kapitole. Na základe intezity dopadajúceho infračerveného žiarenia senzor vyhodnocuje prítomnosť predmetu. Primárne sa infračervené senzory používajú pre detekciu predmetu v krátkej vzdialenosti, čo je aplikované i v tejto práci. Použitý senzor môže fungovať v dvoch režimoch: analógovom a digitálnom.

V analógovom režime je jeden z výstupov senzoru pripojený priamo ku kolektoru fototranzistoru. V závislosti od vzdialenosti cudzieho objektu sa mení úbytok napätia na prechode kolektor-emitor fototranzistoru. Výstupnou veličinou je tak úbytok napätia na fototranzistore meraný mikrokontrolérom.

V digitálnom móde sa meria výstupné napätie na použitom komparátore LM 393. Na neinvertujúci vstup komparátoru je napojený vývod z kolektoru fototranzistora. K invertujúcemu vstupu komparátoru je pripojený potenciometer, ktorým je možné regulovať prahové napätie. Výstup komparátoru sa mení v závislosti od vzdialenosti objektu a nastaveného prahového napätia na potenciometri.



Obrázok 3.1: Schéma zapojenia použitého infračerveného senzoru [9]

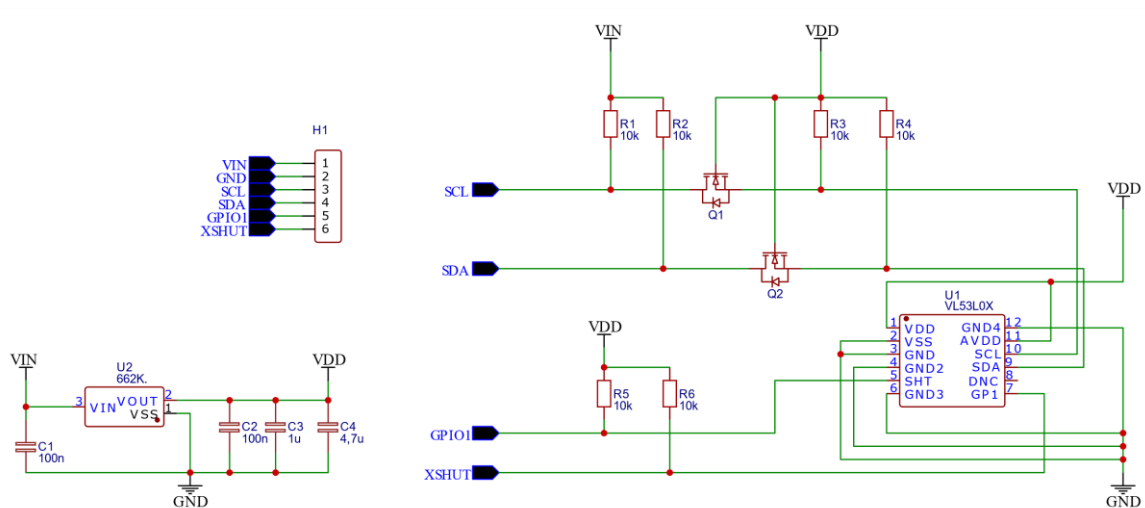
Oproti ultrazvukovému senzoru dokáže infračervený senzor rýchlejšie zachytiť zmenu vo výškovom rozdieli. Umožní tak rýchlejšie a spoľahlivejšie detekovať okraj povrchu v porovnaní s ultrazvukovým senzorom. Pri pohybe na povrchu, ktorý je zhotovený z jedného druhu materiálu, sa namerané hodnoty napätia vždy stabilne pohybovali v okolí určitej ustálenej hodnoty. Pri experimentovaní tak nedochádzalo k falošnému detekovaniu okraja povrchu. Cena ultrazvukového a infračerveného senzoru sa zásadne nelíši.

Nevýhodou použitého infračerveného senzoru je jeho náchylnosť k okolitému infračervenému žiareniu. Vhodnou hardware úpravou je možné čiastočne zabezpečiť imunitu voči okolitému infračervenému žiareniu. Senzor je nevhodný na použítie pri povrchoch, ktoré odlišne absorbujú infračervené žiarenie. Podobne aj farba alebo textúra povrchu majú vplyv na odrazivosť infračervených lúčov. Ďalšou limitáciou senzora je jeho umiestnenie, ktoré musí byť rádovo niekoľko milimetrov od snímaného povrchu.

3.3 Laserový senzor vzdialenosti

Laserové senzory predstavujú ďalšiu možnosť ako zisťovať vzdialenosť od povrchu. Pri návrhu senzorového modulu bol použitý model VL53L0X, vyrábaný spoločnosťou ST Microelectronics. Podobne ako ultrazvukové senzory fungujú na princípe odrazu zvukových vln, laserový senzor VL53L0X detekuje odraz laserových lúčov od povrchu. Zabudovaný VCSEL (Vertical Cavity Surface-Emitting Laser) vyžaruje laserové lúče s vlnovou dĺžkou 940 nm. Senzor je zaopatrený infračervenými filtrami, ktoré poskytujú imunitu voči okolitému rušeniu. V praxi sa senzor používa v bielych spotrebičoch, kde napr. slúži pre detekciu rúk u dávkovača mydla alebo pre automatické zameriavanie u fotoaparátov [10].

Cena senzoru sa mení v závislosti, do akej maximálnej vzdialenosti dokáže senzor pracovať. V práci je použitá cenovo najdostupnejšia verzia, ktorá dokáže snímať vzdialenosť do 120 cm. Doska, na ktorej je umiestnený VL53L0X, obsahuje regulátor napätia na 3,3 V a prevodníky napäťových úrovní zbernice I2C smerom k senzoru. Pri použití VL53L0X je možné používať 5 V logiku mikrokontrolérov ako aj napájanie na 5 V. Počas merania vzdialenosti v rozsahu maximálne 10 cm poskytoval senzor presné údaje s malým rozptylom namenovaných hodnôt vzdialenosti. So zvyšovaním vzdialenosti rástla aj nepresnosť merania. Najvhodnejšie je senzor umiestniť vo výške približne 3 cm od povrchu. Komunikovať so senzorom je možné prostredníctvom rozhrania I2C. Vývod senzoru XSHUT slúži na prepínanie medzi aktívnym režimom pri meraní a úsporným režimom. Pin GPIO1 figuruje ako externý interrupt pre mikrokontrolér. Piny XSHUT a GPIO1 nie sú pripojené na prevodník napäťových úrovní.



Obrázok 3.2: Schéma zapojenia dosky so senzorom VL53L0X [11]

Použitie laserových senzorov VL53L0X predstavuje vhodnú alternatívu voči ultrazvukovým a infračerveným senzorom. Podobne ako infračervené senzory, aj VL53L0X ponúka rýchlu odozvu pri zistenej zmene vzdialenosti. Taktiež by mal VL53L0X disponovať vyššou mierou odolnosti voči okolitému rušeniu. Výrobca modelu VL53L0X udáva, že na meranie vzdialenosti nemajú vplyv parametre povrchu ako je materiál a farba [10]. To by predstavovalo značnú výhodu miesto použitia infračervených senzorov.

Všeobecne veľkou nevýhodou laserových senzorov je ich vysoká cena, ktorá sa napr. u typu TOF10120 pohybuje okolo 300 Kč. Pri plánovanom použití troch senzorov by tak finančné náklady na zhotovenie sensorového modulu boli dosť vysoké. Cena najlacnejšej verzie VL53L0X sa pohybuje okolo 180 Kč, čo je stále niekoľkonásobne viac ako cena použitého infračerveného senzoru s modulom TCRT 5 000.

3.4 Zhodnotenie výberu senzorov

Cieľom tejto práce je zhotoviť sensorový modul, ktorý dokáže rýchlo a spoľahlivo detekovať okraj povrchu a pomôže predísť pádu robota z vyvýšeného miesta. Modul by nemal narušiť jednoduchosť stavby mBot a mal by byť cenovo priateľný. Ultrazvukové senzory boli pre kolísanie nameraných hodnôt vzdialenosti a pomalej odozvy pri zmene prevýšenia z výberu vyradené. Infračervené senzory sú cenovo dostupné, zároveň dokážu rýchlo a presne detekovať prítomnosť povrchu. Robot sa ale s nimi musí pohybovať na povrchu, ktorý na svojej ploche odráža infračervené žiarenie rovnako. Taktiež použitá verzia infračerveného senzoru je náchylná na rušivé vplyvy prostredia. Laserový senzor dokáže v krátkych vzdialenostiach poskytovať presné údaje o výške, v akej sa nachádza robot. Na merania vzdialenosti nemajú vplyv farba a materiál povrchu. Výhody použitia laserového senzoru prevyšujú jeho cenové náklady.

Vývoj sensorových modulov bude pokračovať s infračervenými a laserovými senzormi. Použitý laserový senzor VL53L0X nevyžaduje dodatočné úpravy hardware. U infračerveného senzoru, ktorý využíva modul TCRT 5000, je potrebné realizovať úpravy na potlačenie okolitého infračerveného rušenia. Týmto úpravami infračerveného senzoru sa zaoberá nasledujúca kapitola.

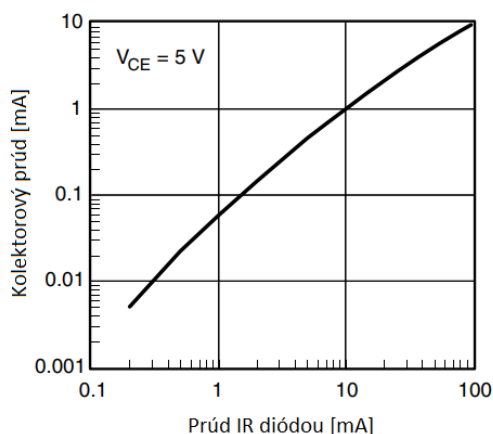
4 Úprava infračerveného proximity senzoru

V tejto kapitole sa nachádza podrobnejší popis modulu TCRT 5 000 a metóda implementovaná na potlačenie okolitého infračerveného žiarenia. Kapitola ďalej popisuje navrhnutú schému zapojenia pre zisťovanie prítomnosti povrchu s modulom TCRT 5 000.

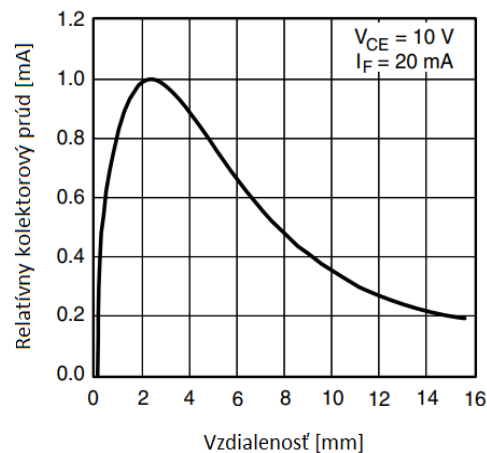
4.1 Modul TCRT 5 000

Základom senzoru ostáva modul TCRT 5 000. Modul pozostáva z infračervenej diódy a fototranzistoru. Infračervená dióda vyžaruje žiarenie s vlnovou dĺžkou 950 nm, čo je približne horná hranica infračerveného elektromagnetického spektra. Povrch fototranzistoru je pokrytý vrstvou, ktorá filtruje viditeľné elektromagnetické spektrum a pomáha tak znížiť pravdepodobnosť rušenia okolitým prostredím. Prevádzkové napätie modulu sa pohybuje v rozmedzí 3 až 5V, ktoré štandardne poskytujú rôzne druhy mikrokontrolérov.

Kolektorový prúd fototranzistoru rastie v závislosti na intenzite dopadajúceho infračerveného žiarenia, ktoré sa buď odrazí od povrchu cudzieho predmetu alebo pochádza z okolitého rušenia. Na obrázku 4.1 je uvedená závislosť medzi prúdom tečúcim infračervenou diódou a kolektorovým prúdom, dostupná z katalógového listu modulu od spoločnosti Vishay Semiconductors [12]. Podľa toho, ako je otvorený prechod kolektor-emitor fototranzistoru sa mení úbytok napätia na fototranzistori.



Obrázok 4.1: Závislosť kolektorového prúdu na prúde pretekajúcej infračervenou diódou



Obrázok 4.2: Závislosť relatívneho kolektorového prúdu od vzdialenosti

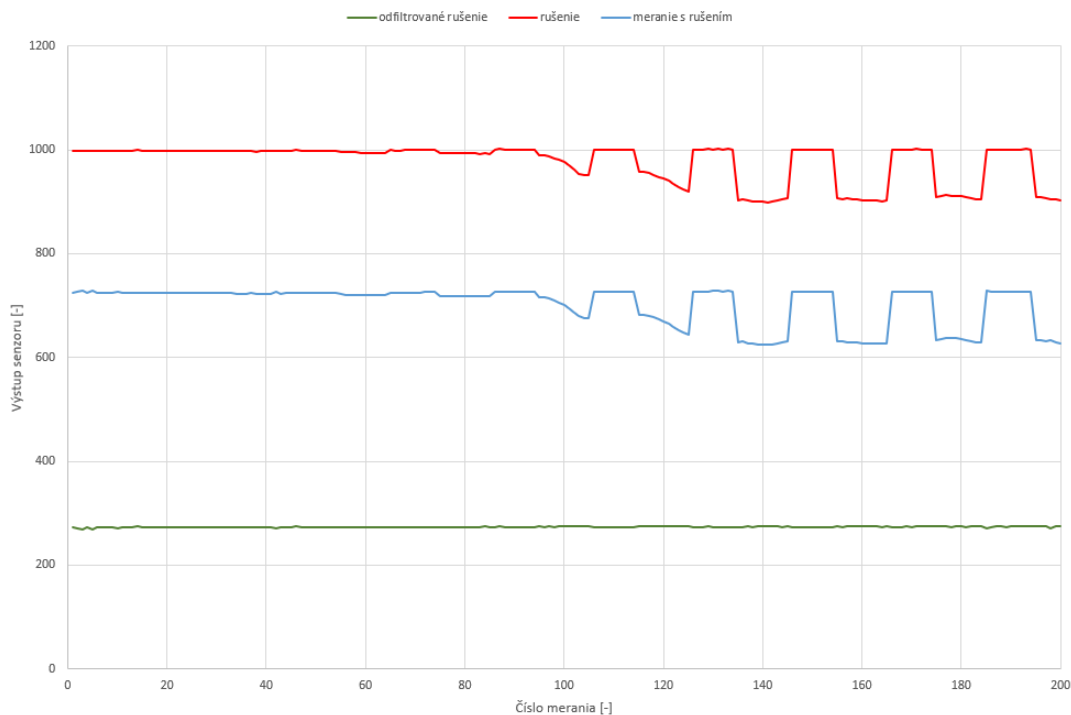
Obrázok 4.2 zobrazuje veľkosť relatívneho kolektorového prúdu v závislosti od vzdialenosti predmetu. Vzdialenosť, pri ktorej dosahuje kolektorový prúd fototranzistoru maximálnu veľkosť, je 2,5 mm. Z obrázku vyplýva, že vzdialenosť medzi modulom a povrchom by sa mala pohybovať v rozmedzí 1 až 6 mm, aby sa dosiahlo čo najrelevantnejšie meranie úbytku napätia na fototranzistori. Podmienky, za ktorých boli merané uvedené charakteristiky, sú uvedené v katalógovom liste senzoru [12].

4.2 Potlačenie okolitého infračerveného rušenia

Jednoduchou metódou, ako z výstupnej hodnoty modulu TCRT 5 000 odfiltrovať rušivú zložku okolia, je vykonať dve hneď po sebe idúce merania napätia. Prvé meranie prebehne štandardne so zapnutou infračervenou diódou. Fototranzistor tak zaznamená odrazené infračervené žiarenie, ako aj žiarenie pochádzajúce z okolitého prostredia. Pri druhom meraní sa poznamená iba údaj z rušenia prostredia, meranie prebehne s vypnutou infračervenou diódou. Výsledný údaj sa vypočíta podľa vzťahu

$$u_{výsl} = -(u_1 - u_2), \quad (4.1)$$

kde u_1 je hodnota merania napätia so zapnutou diódou a u_2 s vypnutou diódou. Záporná hodnota rozdielu napätí umožní pracovať s kladnou hodnotou výsledného napätia.



Obrázok 4.3: Priebehy výstupných hodnôt senzoru

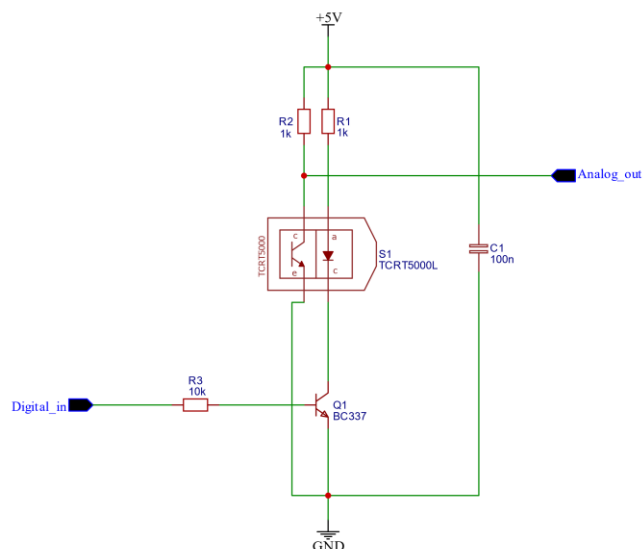
Na obrázku 4.3 sú zobrazené priebehy výstupu senzoru. Modrá farba reprezentuje prvé meranie napätia, červená druhé meranie napätia a zelená výpočet odfiltrovania rušenia podľa vzťahu 4.1. Senzor TCRT 5 000 bol umiestnený s fixnou vzdialenosťou približne 5 mm od cudzieho predmetu. Pre simulovanie rušivého infračerveného žiarenia bola použitá infračervená dióda z druhého modulu TCRT 5 000. Rušenie sa začína prejavovať približne od stého merania napätí, kedy dochádza k skokovým zmenám v priebehoch meraných napätí. Perióda blikania rušivej diódy bola nastavená na 150 ms. Jedno meranie napätia s odoslaním dát po sériovej linke trvalo priemerne 14 ms. Samostatné vykonanie dvoch meraní napätia a odfiltrovanie rušenia zaberá približne 232 μ s. Uvedené časové údaje boli zistené pomocou funkcií na meranie času v kóde v prostredí Arduino IDE.

Z obrázku je patrné, že implementovaná metóda potlačenia rušenia dokáže v značnej miere odfiltrovať okolité infračervené žiarenie. Pri meraní dochádza k minimálnemu rozptylu hodnôt oproti ustálenej hodnote.

4.3 Návrh zapojenia infračerveného senzoru

Komerčne dostupná verzia infračerveného senzoru nie je schopná realizovať navrhnutú metódu potlačenia rušenia. Chýbajú jej potrebné elektronické súčiastky a zapojenie pre spínanie infračervenej diódy. Pre spínanie diódy bol použitý NPN tranzistor BC 337. Maximálny možný pretekajúci prúd diódou dosahuje podľa katalógového listu hodnoty 60 mA. V tejto aplikácii boli hodnoty rezistorov volené tak, aby prúd pretekajúci diódou dosahoval hodnôt v rozmedzí 25 až 30 mA. Zároveň tranzistor pracuje v saturačnej oblasti. Rezistor pripojený v sérii s fototranzistorom má oproti komerčnej verzii senzoru menší odpor. To síce zníži citlivosť senzoru, ale zníži rozptyl nameraných hodnôt napätia.

V zapojení ostal použitý vyrovnávací kondenzátor s kapacitou 100 nF. Ten ale pri stabilnom napätí poskytovaným mikrokontrolérom nie je veľmi potrebný. Kondenzátor medzi analógovým výstupom a zemou bol odstránený. Taktiež nie sú potrebné elektronické súčiastky pre digitálny výstup senzoru, ktorý bol aj v komerčnej verzii nepoužitý. Schéma navrhnutej sensorovej jednotky je zobrazená na obrázku 4.4.



Obrázok 4.4: Schéma zapojenia upraveného infračerveného senzoru

5 Realizácia samostatných senzorových modulov

Kapitola sa zaoberá zapojením, návrhom a realizáciou dosiek plošných spojov pre infračervený a laserový senzorový modul. Kapitola sa ďalej venuje základnému popisu software, ktorý bol implementovaný pre jednotlivé senzorové moduly a dosku mCore. Posledná časť kapitoly sa venuje popisu komunikácie po I2C zbernici medzi senzorovými modulmi a doskou mCore.

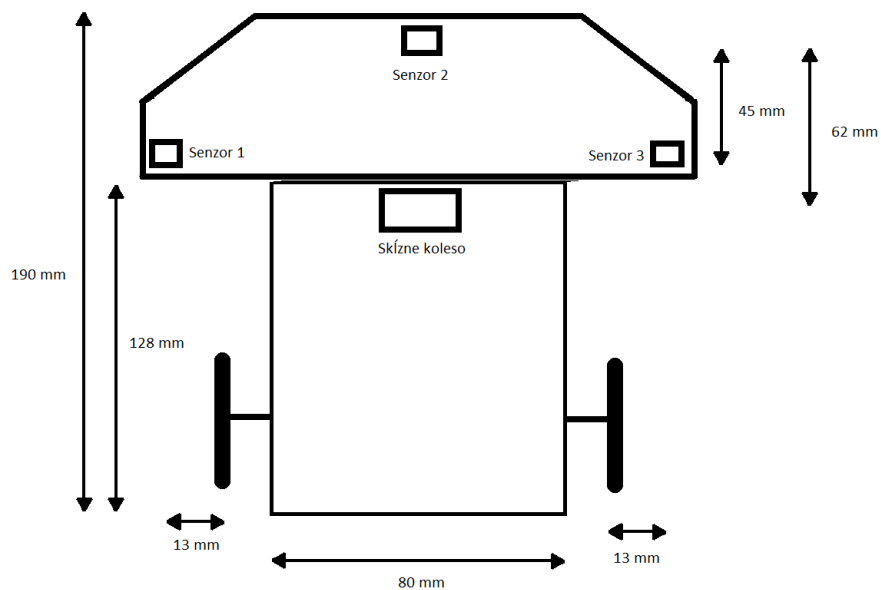
5.1 Návrh a realizácia dosiek plošných spojov

Základ infračerveného senzorového modulu tvoria tri infračervené senzory, ktorých zapojenie je uvedené v kapitole 4. Infračervené diódy senzorov sú zapojené paralelne a spína ich naraz jeden tranzistor. Tri analógové výstupy zo senzorov a jeden digitálny vstup by bolo možné pripojiť priamo ku konektorom RJ25 dosky mCore. To by však zabralo tri zo štyroch dostupných konektorov a bolo by tak znemožnené použiť ďalšie periférie pre robota. Preto je v návrhu použitý mikrokontrolér Arduino Nano. Výber mikrokontroléru Arduino Nano bol podmienený jeho rozmermi, kompatibilitou s doskou mCore (obe využívajú mikroprocesor Atmega 328) a dostupnosťou rôznych knižníc. Úlohou mikrokontroléru bude spracovať namerané údaje a vypočítať výkony, ktoré aplikuje doska mCore na motory. K vyrovnávaciemu keramickému kondenzátoru je pridaný elektrolytický kondenzátor s väčšou kapacitou. K vetvám zbernice I2C sú pripojené dva pull-up rezistory. Schéma zapojenia infračerveného modulu je uvedená v prílohe B. Na doske plošných spojov treba pridať štyri káblové prepojenia a tri premostenia medzi vrchnou a spodnou stranou dosky.

Laserový senzorový modul tvoria podobne ako infračervený modul tri dosky s laserovými senzormi VL53L0X. Uvedený laserový senzor nevyžaduje dodatočné úpravy hardware. K celkovému zapojeniu sú pridané pull-up rezistory pre zbernicu I2C a vyrovnávacie kondenzátory. Pre spracovanie nameraných vzdialeností a komunikáciu s doskou mCore je opäť použitý mikrokontrolér Arduino Nano. Schéma zapojenia laserového senzorového modulu je uvedená v prílohe D. Na doske je potrebné doplniť osem káblových prepojení.

Návrh dosiek plošných spojov prebiehal v prostredí Easy EDA. Vývojové prostredie je voľne dostupné a návrh dosiek plošných spojov možno vykonať vo webovom prehliadači. Dosky plošných spojov boli vyrobené vedúcim práce. Oba senzorové moduly je možné napájať priamo doskou mCore, bez nutnosti použitia regulátora napätia.

Na obrázku 5.1 je uvedené približné osadenie senzorov na doskách plošných spojov a porovnanie vzdialeností senzorov vzhľadom ku konštrukcii mBota. Vzdialenosť medzi stredovým sensorom a kolesom otočným v pozdĺžnom smere je 62 mm. Vzdialenosť medzi niektorým z okrajových senzorov a hnacím kolesom je 13 mm. Okrajové senzory sa nachádzajú v jednej línii. Rozdiel vzdialenosti medzi stredovým sensorom a líniou okrajových senzorov je 45 mm. Toto umiestnenie senzorov na konštrukcii stavebnice mBot umožňuje pri pohybe s veľkým predstihom detekovať okraj povrchu. Laserové senzory snímajú povrch zo vzdialenosti 25 mm, infračervené senzory zo vzdialenosti 5 mm. Šírka dosky plošných spojov s infračervenými senzormi je 174 mm. Doska osadená s laserovými senzormi má šírku 160 mm. Napriek rozličným šírkam dosiek plošných spojov umiestnenie senzorov ostáva rovnaké.



Obrázok 5.1: Vzdialenosti senzorov vzhľadom ku konštrukcii mBota

5.2 Programovanie senzorových modulov

Programovanie dosiek Arduino Nano a mCore prebiehalo vo vývojovom prostredí Arduino IDE. Program pre dosku mCore bol navrhnutý tak, aby nebol výpočtovo náročný. Program obsahuje funkciu pre zápis hodnôt výkonu zo zbernice I2C, ktoré doska mCore aplikuje na motory. Funkcia tiež meria dobu medzi prijatými hodnotami pre motory zo zbernice I2C. Ak doba prekročí užívateľom stanovený čas, dôjde k zastaveniu chodu robota. Vo verzii s infračerveným modulom je vo funkcii pridaná požiadavka, ktorá umožňuje doske mCore vytvárať požiadavky na zistenie hodnôt výkonu pre motory. Oba implementované programy zaberajú necelých 5 kB flash pamäti dosky mCore.

Všetky potrebné úkony pre vykonávanie meraní a výpočet hodnôt pre výkony motorov boli umiestnené v programe pre dosku Arduino Nano. V tabuľke 5.1 je uvedený základný popis vybraných premenných a v tabuľke 5.2 zoznam implementovaných funkcií.

Názov premennej	Typ	Maximálna hodnota	Popis
P_set	byte	254	nominálny výkon motorov
k _p	float	ľubovoľná	proporcionálna regulačná konštanta
threshold_distance (threshold_voltage)	int	ľubovoľná	maximálne povolené prevýšenie (napätie)
power	byte array	254	blok výkonov pre motory
current_distance (current_voltage)	int array	1023 pre infračervený senzor, 8190 pre laserový senzor	blok aktuálnych vzdialeností (napätí) senzorov od povrchu
base_voltage	int array	1023 pre infračervený senzor	blok fixných napätí infračervených senzorov pri spustení robota
num_measurement	int	ľubovoľná	počet po sebe idúcich meraní

Tabuľka 5.1: Prehľad použitých základných premenných v programe pre Arduino Nano

Názov funkcie	Vstupné argumenty
find_distance	base_voltage (infračervený modul) alebo current_distance (current_voltage), num_measurement
calculate_basic_avoidance	base_voltage (infračervený modul), current_distance (current_voltage)
P_edge_follower	base_voltage (infračervený modul), current_distance (current_voltage)
requestEvent	

Tabuľka 5.2: Prehľad funkcií implementovaných pre Arduino Nano

Úlohou funkcie *find_distance* je priebežne dopĺňať údaje o aktuálnych vzdialenostiach senzorov od povrchu. U infračerveného sensorového modulu funkcia vykonáva merania napätí uvedené v kapitole 3. Pri spustení robota u tohto modulu sa funkcia tiež používa na zistenie fixného napätia. Funkcia so zapojeným laserovým sensorovým modulom prostredníctvom zbernice I2C zisťuje namerané hodnoty vzdialenosti laserových senzorov. Pri použití laserových senzorov nie je nutné pri spustení robota merať fixnú vzdialenosť od povrchu. Vstupná premenná *num_measurement* funkcie vyjadruje koľkokrát má meranie prebehnúť. Výsledná hodnota vzdialenosti alebo napätia sa určí ako aritmetický priemer z počtu meraní, čo má za úlohu zvýšiť presnosť merania vzdialenosti a napätia.

Hlavnou úlohou funkcie *calculate_basic_avoidance* je korigovať pohyb robota podľa údajov zo senzorov a predísť pádu z vyvýšeného miesta. Pre infračervený modul najprv funkcia vypočíta rozdiel medzi aktuálnou hodnotou napätia a fixným napätím pri spustení. Rozdiely vzdialenosti alebo napätí u každého senzoru sa následne porovnávajú s definovaným maximálnym povoleným prevýšením alebo napätím. Zistené údaje o vzdialenosti z laserových senzorov možno priamo porovnať sa maximálnym povoleným prevýšením. Celočíselnými hodnotami v rozmedzí 0-255 možno regulovať výkony motorov. V tabuľke 5.3 je uvedené ako prebieha výber hodnôt, ktoré sa aplikujú na motory. Pre ilustráciu bola stanovený nominálny výkon pravého motoru na hodnotu $P_{set} = 100$ pre chod dopredu (ľavý motor používa záporné hodnoty pre chod dopredu). Dvojica čísel výkonov pravého a ľavého motoru 100 a -100 reprezentuje pohyb vpred. Dvojica -100 a -100 vykonáva otáčanie na mieste doľava. Posledná kombinácia výkonov 100 a 100 vykonáva otáčanie na mieste doprava. Korekcia pohybu skončí, keď všetky senzory začnú hlásiť prítomnosť povrchu.

Povolené prevýšenie (ľavý senzor)	Povolené prevýšenie (stredný senzor)	Povolené prevýšenie (pravý senzor)	Výkon pravého motoru [-]	Výkon ľavého motoru [-]
neprekročené	neprekročené	neprekročené	100	-100
prekročené	neprekročené	neprekročené	-100	-100
neprekročené	prekročené	neprekročené	100	100
neprekročené	neprekročené	prekročené	100	100
prekročené	prekročené	neprekročené	-100	-100
neprekročené	prekročené	prekročené	100	100
prekročené	prekročené	prekročené	100	100

Tabuľka 5.3: Výber výkonov pre motory na základe údajov zo senzorov

Druhou funkciou pre ovládanie pohybu robota je *P_edge_follower*. Funkcia pracuje podobne ako *calculate_basic_avoidance*. Pokiaľ nie je detekovaná prekážka, motory bežia vpred. Pri detekcii prekážky sa vykoná korekcia pohybu uvedená v tabuľke 4.3. Ak prekážku detekoval iba jeden z okrajových senzorov, tak sa nastaví tento senzor na sledovanie okraja povrchu. Pomocou jednoduchého P regulátoru sa následne upravujú výkony pre motory. Meranou veličinou pre regulovanie výkonov motorov je doba v milisekundách, počas ktorej sa senzor nachádza nad povrchom alebo mimo neho. Referenčná hodnota doby bola zvolená na 0 ms, čo reprezentuje hranicu medzi detekovaním povrchu a prekážky. Ak okraj povrchu sleduje ľavý senzor, a zároveň sa senzor nachádza nad povrchom, tak výkon pre ľavý motor sa určí podľa vzťahu

$$P = P_{set} + k_p e, \quad (4.1)$$

kde P_{set} je nominálny výkon motorov, k_p proporcionálna konštanta a e chyba času oproti referenčnej hodnote. Pravý motor pracuje bez zmeny s výkonom P_{set} . Ak sa senzor nachádza mimo povrchu, začne sa regulovať výkon pravého motoru. Ľavý motor pokračuje v činnosti s výkonom $-P_{set}$. Sledovanie okraja povrchu pravým sensorom prebieha analogicky. Minimálny výkon motorov pri regulácii bol nastavený na hodnotu 40. Sledovanie okraja povrchu sa preruší, ak niektorý zo zvyšných senzorov zachytí prekážku. Experimentálne bol regulátor overený s nastaveným výkonom $P_{set} = 100$ a $k_p = 0,1$. Pri nastavení vyššieho výkonu P_{set} je potrebné zväčšiť aj konstantu k_p . Pohyb má kmitavý charakter, ktorý by bolo možné znížiť pridaním integrálnej regulačnej konštanty. Ladenie parametrov PI prípadne PID regulátoru ale nie je predmetom tejto práce.

Poslednou funkciou implementovanou v programe dosky Arduino Nano pre infračervený senzorový modul je *requestEvent*, ktorá sa spúšťa na základe požiadavky zo strany dosky mCore s cieľom zistiť výkon motorov. Na rozlíšenie znamienok pre hodnoty výkonov sú použité pomocné bytové premenné.

5.3 Komunikácia na zbernici I2C

Najvhodnejší spôsob ako realizovať komunikáciu medzi doskami mCore a Arduino Nano je pomocou rozhrania I2C. Sensorové moduly je možné pripojiť na ľubovoľný konektor RJ25 dosky mCore, keďže disponujú linkami zbernice. Pre komunikáciu medzi doskou mCore a sensorovými modulmi bola použitá Arduino knižnica Wire.h.

V prípade zapojenia infračerveného sensorového modulu doska mCore plní rolu riadiaceho obvodu (Master) a Arduino Nano rolu riadeného obvodu (Slave). Komunikácia prebieha formou požiadavky na výkon pre motory od dosky mCore. Arduino Nano na základe žiadosti odošle dátový blok s hodnotami výkonov o veľkosti 4B.

Pri použití laserového sensorového modulu rolu Master plní Arduino Nano. Laserové senzory a doska mCore sú v konfigurácii Slave. Toto rozloženie umožňuje jednoduchšiu interakciu so senzormi ako v prípade, keby aj mCore plnil rolu Master. Pre konfigurovanie a meranie vzdialenosti s laserovými senzormi bola použitá knižnica od Pololu Robotics & Electronics [13]. V tabuľke je uvedený prehľad použitých funkcií z tejto knižnice.

Názov funkcie	Vstupné premenné	Popis
init		Inicializovanie senzoru
setAddress	uin8_t new_addr	Nastavenie novej 7-bitovej adresy senzoru
startContinuous		Spustenie nepretržitého merania vzdialenosti
readRangeContinuousMillimeters		Zistenie hodnoty vzdialenosti v mm

Tabuľka 5.4: Použité funkcie pre komunikáciu s laserovými senzormi

Po zistení a spracovaní dát z laserových sensorov sa podobne ako u modulu s infračervenými senzormi odosiela blok dát s výkonmi pre motory o veľkosti 4B, ktoré zapisuje doska mCore.

6 Výsledky práce

Kapitola sa zaoberá testovaním vyhotovených senzorových modulov a interpretovaním dosiahnutých výsledkov. Pri testoch bolo zistené s akou úspešnosťou modul správne vyhodnotí prekážku, koľkokrát modul detekuje prekážku falošne, prípadne kedy ju vôbec nezaznamená, a tak sa robot nevyhne sa pádu. Ďalej bolo pri poslednom teste zisťované, v akej vzdialenosti od prekážky sa robot zastaví pri rôznych rýchlostiach motorov.

6.1 Pohyb na platforme s vysokým prevýšením

V teste sa robot pohyboval na vyvýšenej platforme, kde prevýšenie medzi zemou a platformou bolo 80 cm. Platforma z dreva mala rozmery 110 x 60 cm. Laserový senzorový modul mal nastavené maximálne povolené prevýšenie 50 mm. Infračervený modul mal nastavené maximálne povolené prekročenie napätia na hodnote 80, čo predstavuje rozdiel napätí približne 440 mV. Pri teste s infračerveným modulom nebolo simulované rušenie. Robot bol naprogramovaný tak, aby celkovo vykonal 200 korekcií pohybu a následne sa zastavil. Korekciu pohybu vykonávala funkcia *calculate_basic_avoidance*. Pozorovaním robota počas jeho chodu bol stanovený počet falošne vykonaných korekcií pohybu. Pre zvýšenie presnosti pri posudzovaní správnosti pohybu robota bolo pridané časové oneskorenie o veľkosti 40 ms medzi prijatím správy a aplikovaním výkonov na motory. Funkcia *find_distance* vykonávala jedno meranie vzdialenosti alebo napätia. Maximálne výkony motorov robota boli nastavené na hodnotu 150.

	Vykonané korekcie pohybu	Správne vykonané korekcie		Falošne vykonané korekcie		Nezaznamenanie prekážky	
	Počet [-]	Počet [-]	Presnosť [%]	Počet [-]	Presnosť [%]	Počet [-]	Presnosť [%]
Infračervený modul	200	198	99,0	2	1,0	0	0,0
Laserový modul	200	195	97,5	5	2,5	0	0,0

Tabuľka 6.1: Záznam vykonaných korekcií pohybu robota pri vysokom prevýšení

Pri značnom prevýšení robot s vysokou pravdepodobnosťou detekoval správne okraj povrchu. Miera falošnej detekcie prekážky je pre oba senzorové moduly veľmi nízka. Počas pohybu robota nikdy nenastala situácia, že by robot spadol z vyvýšeného miesta.

6.2 Pohyb na platforme s nízkym prevýšením

V teste bolo prevýšenie medzi platformou a zemou nastavené na hodnotu 2 cm. Platforma z dreva mala rozmery 60 x 40 cm. Laserový sensorový modul mal nastavené maximálne povolené prevýšenie 35 mm. Infračervený modul mal nastavené maximálne povolené prekročenie napätia na hodnote 50 (rozdiel 275 mV). Pri pohybe sa vykonávalo jedno meranie vzdialenosti alebo napätia. Ostatné podmienky ako aj vyhodnocovanie správnosti korekcie pohybu bolo rovnaké ako pri teste s vysokým prevýšením. Cieľom testu bolo zistiť ako dokážu senzory ovládať pohyb robota, keď je požadovaná vyššia presnosť meraní.

	Vykonané korekcie pohybu	Správne vykonané korekcie		Falošne vykonané korekcie		Nezaznamenanie prekážky	
	Počet [-]	Počet [-]	Presnosť [%]	Počet [-]	Presnosť [%]	Počet [-]	Presnosť [%]
Infračervený modul	200	194	97,0	6	3,0	0	0,0
Laserový modul	200	158	79,0	42	21,0	0	0,0

Tabuľka 6.2: Záznam vykonaných korekcií pohybu robota pri nízkom prevýšení

Infračervený sensorový modul dosiahol podobných výsledkov ako v predošlom teste. U laserového modulu došlo k zvýšeniu falošného detekovania okraja. Mieru falošného detekovania okraja možno znížiť pri vykonaní viacerých meraní vzdialenosti vo funkcii *find_distance*. Nenastala situácia, že by robot spadol z vyvýšeného miesta.

6.3 Pohyb na povrchu tvoreného odlišnými materiálmi

Podmienky, za ktorých sa vykonal test, boli rovnaké ako pri testovaní s vysokým prevýšením. Určité časti platformy boli prekryté čiernym papierom, ktorý by mal do značnej miery absorbovať infračervené žiarenie. Približne 20 % povrchu platformy bol takto prekrytý. Cieľom testu bolo zistiť, ako sensorové moduly reagujú na zmenu odrazivosti infračerveného žiarenia od povrchu platformy.

	Vykonané korekcie pohybu	Správne vykonané korekcie		Falošne vykonané korekcie		Nezaznamenanie prekážky	
	Počet [-]	Počet [-]	Presnosť [%]	Počet [-]	Presnosť [%]	Počet [-]	Presnosť [%]
Infračervený modul	200	132	66,0	68	34,0	0	0,0
Laserový modul	200	197	98,5	3	1,5	0	0,0

Tabuľka 6.3: Záznam vykonaných korekcií pri pohybe robota na rôznych povrchoch

Laserový sensorový modul dosiahol podobné výsledky ako pri meraní v časti 5.1. Podľa očakávania vzrástla miera falošného detekovania prekážky u infračerveného modulu.

6.4 Meranie vzdialenosti od okraja povrchu pri detekovaní prekážky

Pri tomto meraní sa robot pohyboval rôznymi rýchlosťami smerom kolmo k okraju povrchu. Po detekcii okraja stredovým sensorom robot zastavil. Zisťovala sa vzdialenosť medzi okrajom povrchu a sklzným kolesom robota. Na základe týchto vzdialeností možno stanoviť akou maximálnou rýchlosťou sa môže robot pohybovať, aby sa dokázal bezpečne vyhnúť prekážke. Bezpečná vzdialenosť od okraja povrchu bola stanovená na 40 mm. Táto vzdialenosť poskytuje rezervu pri otáčaní robota.

Výkon motorov [-]	Vzdialenosť [mm]
80	54
100	52
150	45
190	39
210	36
230	34
254	29

Tabuľka 6.4: Závislosť vzdialenosti od okraja povrchu na výkone motorov

Robot sa s oboma sensorovými modulmi môže bezpečne pohybovať po platforme s maximálnym výkonom motorov približne 190. Pri dlhšom experimentovaní s robotom bol maximálny výkon motorov nastavený na hodnotu 200.

6.5 Diskusia výsledkov

Vykonané testy ukázali, že robot s navrhnutými modulmi sa dokáže bezpečne pohybovať na vyvýšenom mieste. Oba sensorové moduly dokážu s vysokou pravdepodobnosťou správne vyhodnotiť, kedy sa senzor nachádza mimo platformy a včas vykonať potrebné protiopatrenia voči pádu.

Jednoduchší infračervený sensorový modul dokáže pracovať spoľahlivo pokiaľ sa pohybuje po platforme, ktorej povrch rovnako odráža infračervené žiarenie. V situáciach, keď by senzory nevedeli rozoznať rozdiel medzi prítomnosťou a neprítomnosťou povrchu, je modul nepoužiteľný. Takéto prípady sú však veľmi nepravdepodobné. Výhodnejšie je použiť infračervený modul namiesto laserového modulu pri pohybe na platforme vytvorenej z rovnakého materiálu.

Značnou výhodou zhotoveného laserového sensorového modulu oproti infračervenému modulu je možnosť pohybu po platforme, ktorá je zhotovená z rozličných materiálov. Cenové náklady modulu sú však vyššie ako v prípade infračerveného modulu.

Ani jeden sensorový modul neumožňuje bezpečný pohyb s maximálnym výkonom motorov. Aby sa robot mohol pohybovať po platforme svojou maximálnou rýchlosťou, bolo by nutné zväčšiť rozmery dosiek plošných spojov. Toto riešenie je nepraktické, rozmery dosiek by boli robustnejšie.

Jedným spôsobom ako vylepšiť infračervený sensorový modul je pridanie dodatočnej elektroniky, ktorá by umožnila zistiť či došlo k zmene prevýšenia alebo k zmene odrazivosti infračerveného žiarenia od povrchu. Napríklad, ku každému infračervenému senzoru by mohol byť pridaný ultrazvukový senzor vzdialenosti. Snímanie povrchu by zabezpečovali infračervené senzory. Ak by došlo k detekovaniu prekážky infračerveným sensorom, meraním vzdialenosti pomocou príslušného ultrazvukového senzoru by bolo možné určiť, či infračervený senzor správne vyhodnotil prekážku. V prípade falošného detekovania prekážky by sa príslušná hodnota napätia senzoru uložila. Ak by mal robot uložené hodnoty napätí, pri ktorých nastala zmena typu povrchu, znížila by sa miera falošného detekovania okraja povrchu. Týmto vylepšením by mohol infračervený modul byť cenovo lepší ako modul laserový.

7 Záver

V práci boli navrhnuté a realizované senzorové moduly, ktoré pozostávajú z infračervených proximity senzorov a laserových senzorov vzdialenosti. Zhotovené senzorové moduly dokážu pri pohybe robota včas detekovať okraj povrchu a predísť pádu z vyvýšeného miesta.

Moduly sú realizované na samostatných doskách plošných spojov. Ku konštrukcii mBota je ich možné pripevniť skrz otvory so závitmi. Na prepojenie modulov s doskou mCore možno použiť ktorýkoľvek z RJ25 konektorov dosky. K senzorovým modulom nie je možné zároveň umiestniť senzor sledovania čiary. Úpravou kódu pre infračervený modul by bolo možné čiastočne nahradiť funkciu senzoru sledovania čiary. Ostatné periférie dostupné k stavebnici mBot možno pripojiť bez obmedzení. Programy implementované pre dosku mCore boli navrhnuté tak, aby neboli výpočtovo a pamäťovo náročné. Vďaka veľkej rezerve v pamäti dosky mCore je možné k stavebnici pripojiť ďalšie senzory a aktuátory napr. pre skenovanie okolitého prostredia. Komunikácia na I2C zbernici medzi niektorým z modulom a doskou mCore je jednoduchá vďaka dostupnej knižnici Arduino.

Testy ukázali, že oba senzorové moduly dokážu vo vysokej miere správne detekovať okraj povrchu. Miera falošného detekovania okraja povrchu bola vo väčšine testov veľmi nízka. Hlavnou nevýhodou infračerveného senzorového modulu je vysoká miera falošnej detekcie pri pohybe na povrchu z rozličných materiálov a farieb. Menej závažnou nevýhodou modulu je nutnosť snímania povrchu z nízkej vzdialenosti. Jedinou závažnou nevýhodou laserového modulu je jeho cena.

Zoznam použitej literatúry

[1] Pérula-Martínez, R. - García-Haro, J. M. - Balaguer, C. - et al.: Developing Educational Printable Robots to Motivate University Students Using Open Source Technologies, Journal of Intelligent & Robotic Systems, [online], 20. 1. 2015. [cit. 14.5. 2021]

Dostupné: <https://raulperula.github.io/papers/Perula-Martinez2015a.pdf>

[2] Makeblock: Entry-level educational robot kit, [online], [cit. 1.3. 2021]

Dostupné: <https://www.makeblock.com/mbot>

[3] Daněk Lukáš: Využití platformy mBot pro návrh robotického podvozku, [online], 21.5. 2020, [cit. 1.3. 2021]

Dostupné: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/87640>

[4] Makeblock: RJ25 adapter, [online], [cit. 1.3. 2021]

Dostupné: <https://www.makeblock.com/project/me-rj25-adapter>

[5] Makeblock: mCore, [online], [cit. 15.5. 2021]

Dostupné: <http://docs.makeblock.com/diy-platform/en/electronic-modules/main-control-boards/mcore.html>

[6] Makeblock-official: Makeblock-Libraries, [online], [cit. 1.3. 2021]

Dostupné: <https://github.com/Makeblock-official/Makeblock-Libraries>

[7] Reese Lynnette: The working principle, applications and limitations of ultrasonic sensors, [online], 6.8. 2019, [cit. 2.3. 2021]

Dostupné: <https://www.microcontrollertips.com/principle-applications-limitations-ultrasonic-sensors-faq/>

[8] Jalan Kebudayaan: Product User's Manual – HCSR04 Ultrasonic Sensor, [online], 05/2013, [cit. 2.3. 2021]

Dostupné: <http://web.eece.maine.edu/~zhu/book/lab/HC-SR04%20User%20Manual.pdf>

[9] Carmine Forino: Detecting obstacle with IR sensor and arduino, [online], 28.12. 2018, [cit. 7.4. 2021]

Dostupné: <https://www.playembedded.org/blog/detecting-obstacle-with-ir-sensor-and-arduino/>

[10] STMicroelectronics: Katalógový list senzoru VL53L0X, [online], [cit. 24.4. 2021]

Dostupné: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/vl53l0x.pdf>

[11] Wiring the VL53L0X ToF Accurate Laser Ranging / Distance Measuring Sensor on Microcontroller, [online], [cit. 22.4.]

Dostupné: <https://www.14core.com/wiring-the-vl53l0x-tof-laser-measurement-ranging-sensor-on-microcontroller/>

[12] Vishay Semiconductors: Katalógový list senzoru TCRT 5 000, [online], [cit. 12.4. 2021]

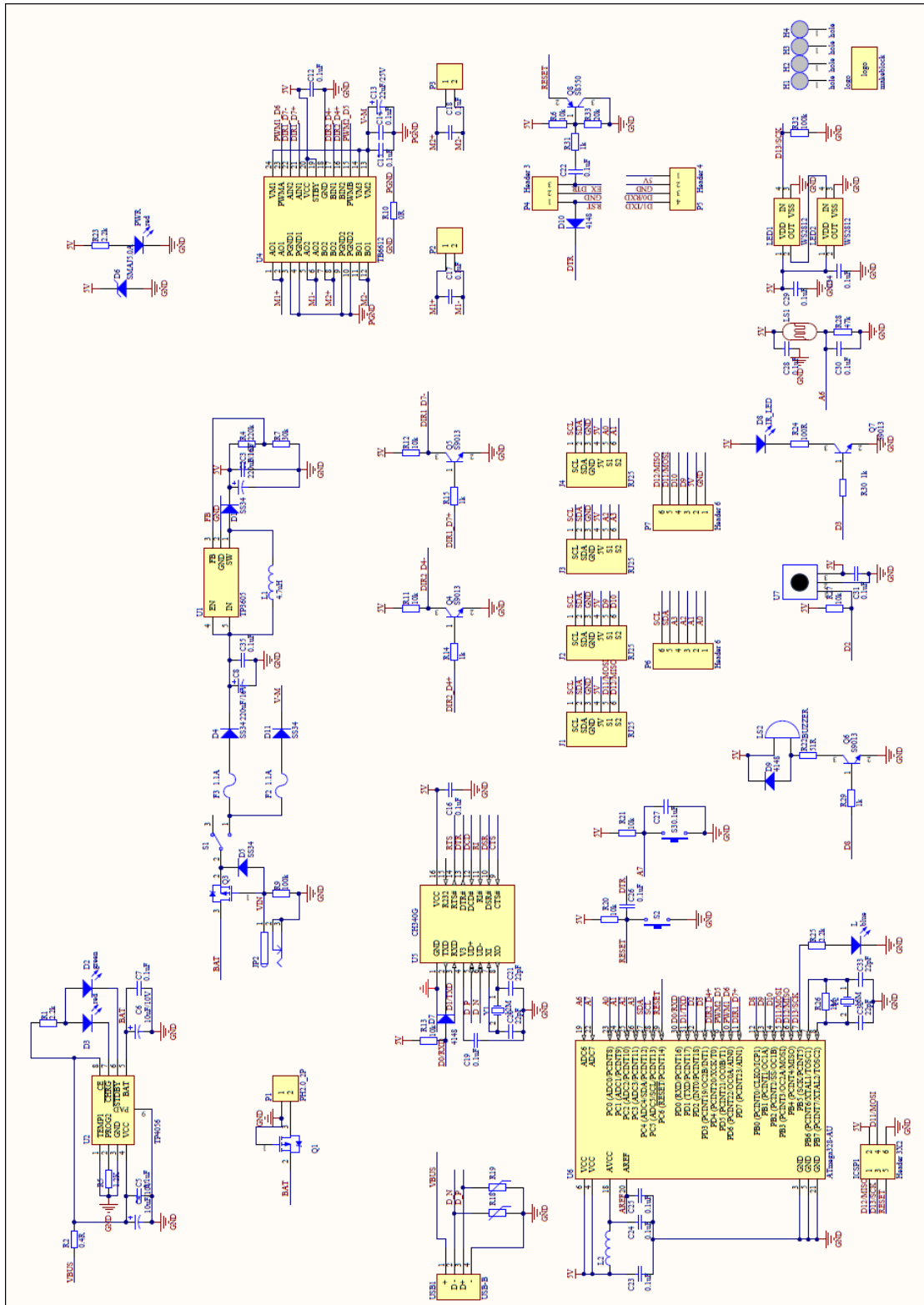
Dostupné: <https://www.vishay.com/docs/83760/tcrt5000.pdf>

[13] Pololu: VL530X library, [online], 20.9. 2020, [cit. 2.5. 2021]

Dostupné: <https://github.com/pololu/vl53l0x-arduino>

Príloha A

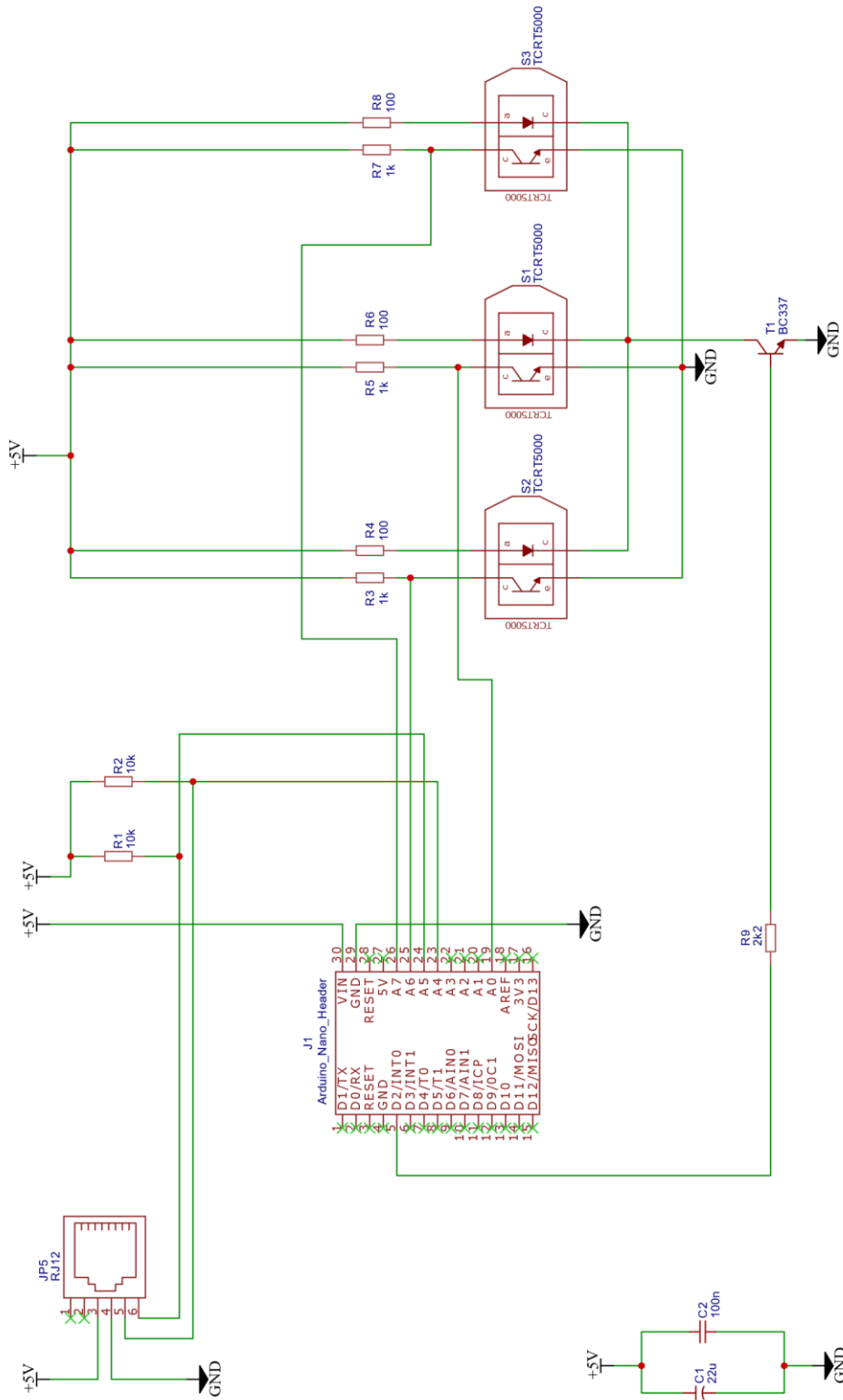
Schéma dosky mCore



Obrázok A.1: Schéma dosky mCore [5]

Príloha B

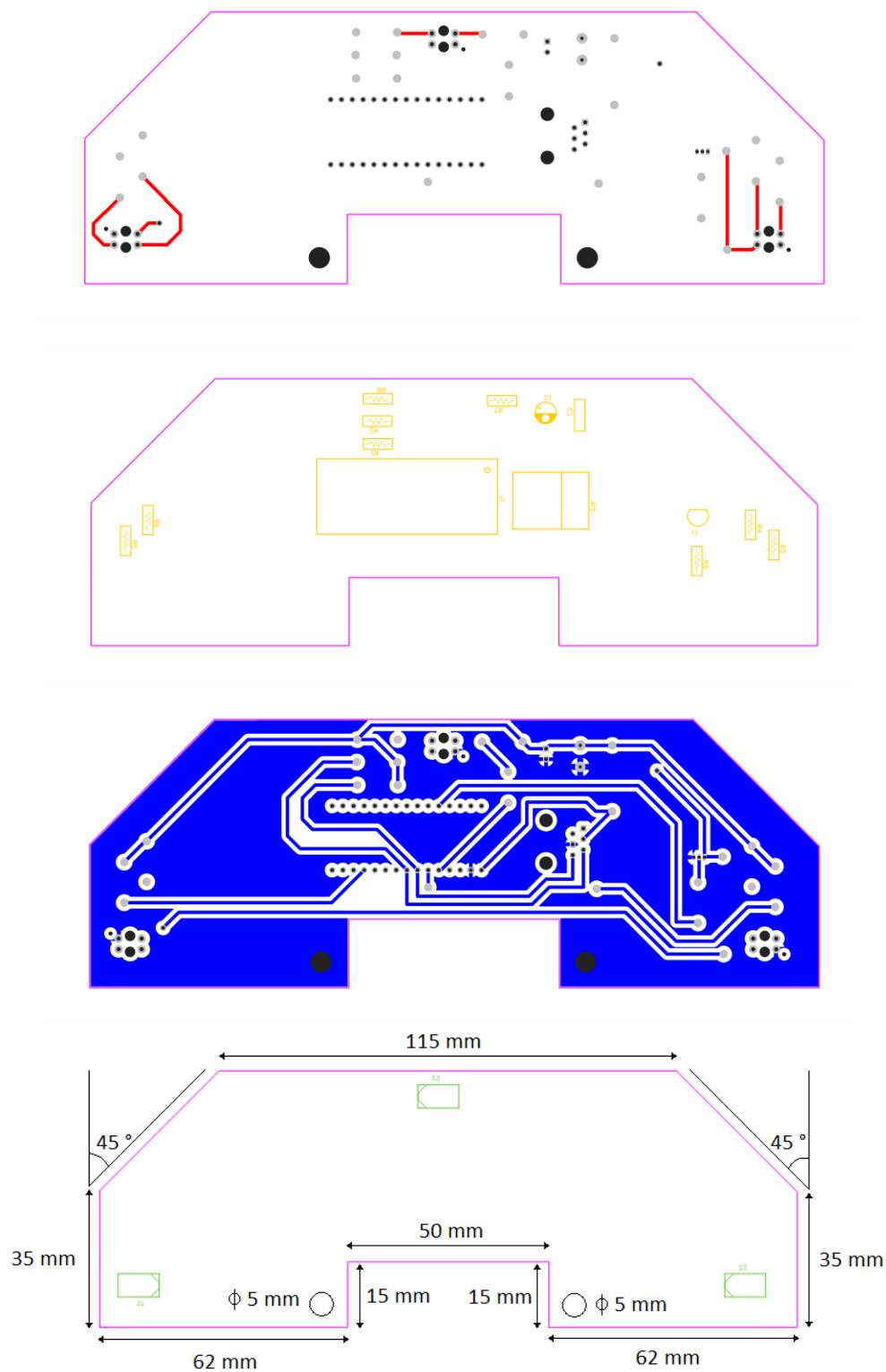
Schéma zapojenia infračerveného senzorového modulu



Obrázok B.1: Schéma zapojenia infračerveného senzorového modulu

Príloha C

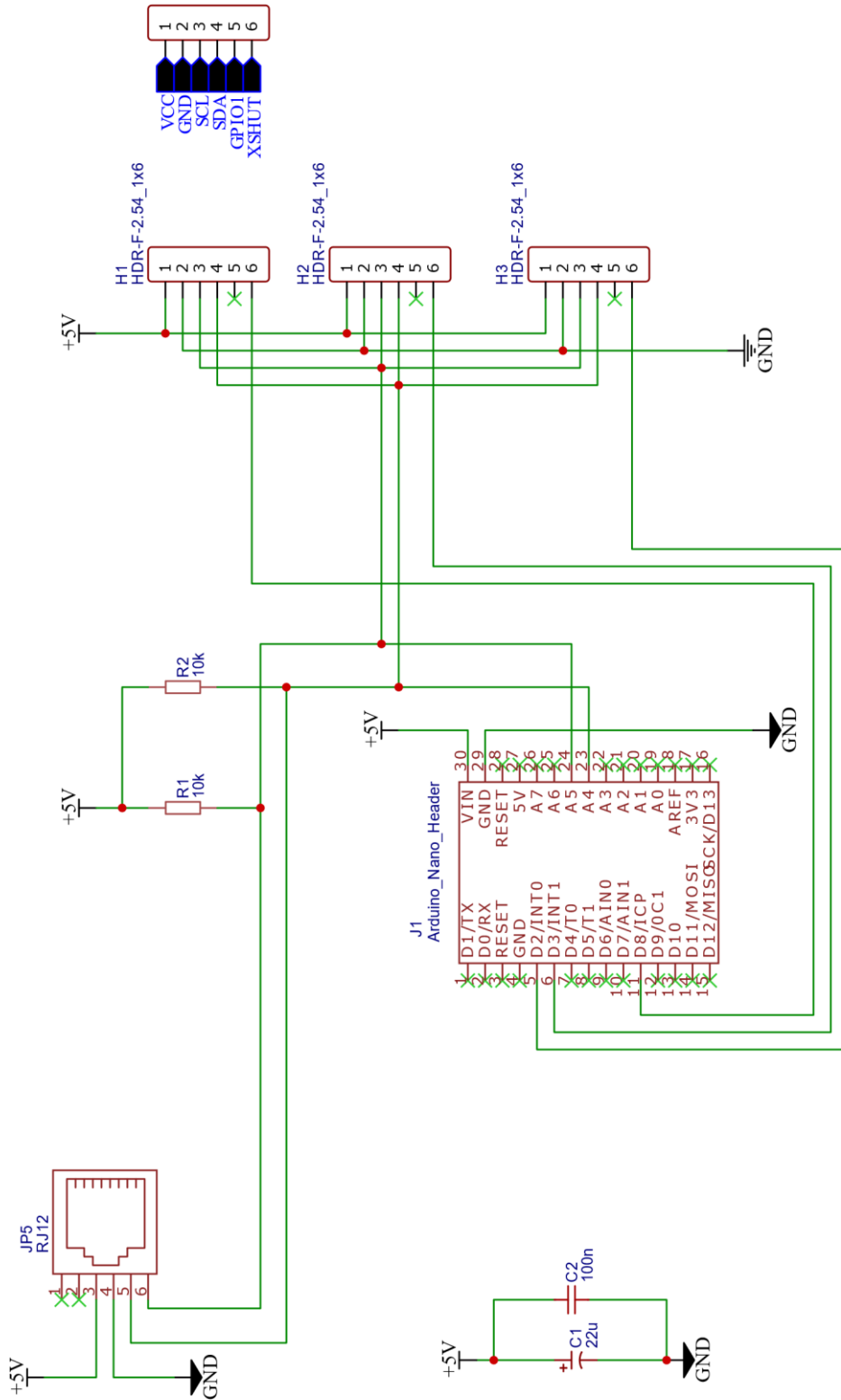
Doska plošných spojov infračerveného sensorového modulu



Obrázok C.1: Doska plošných spojov infračerveného sensorového modulu

Príloha D

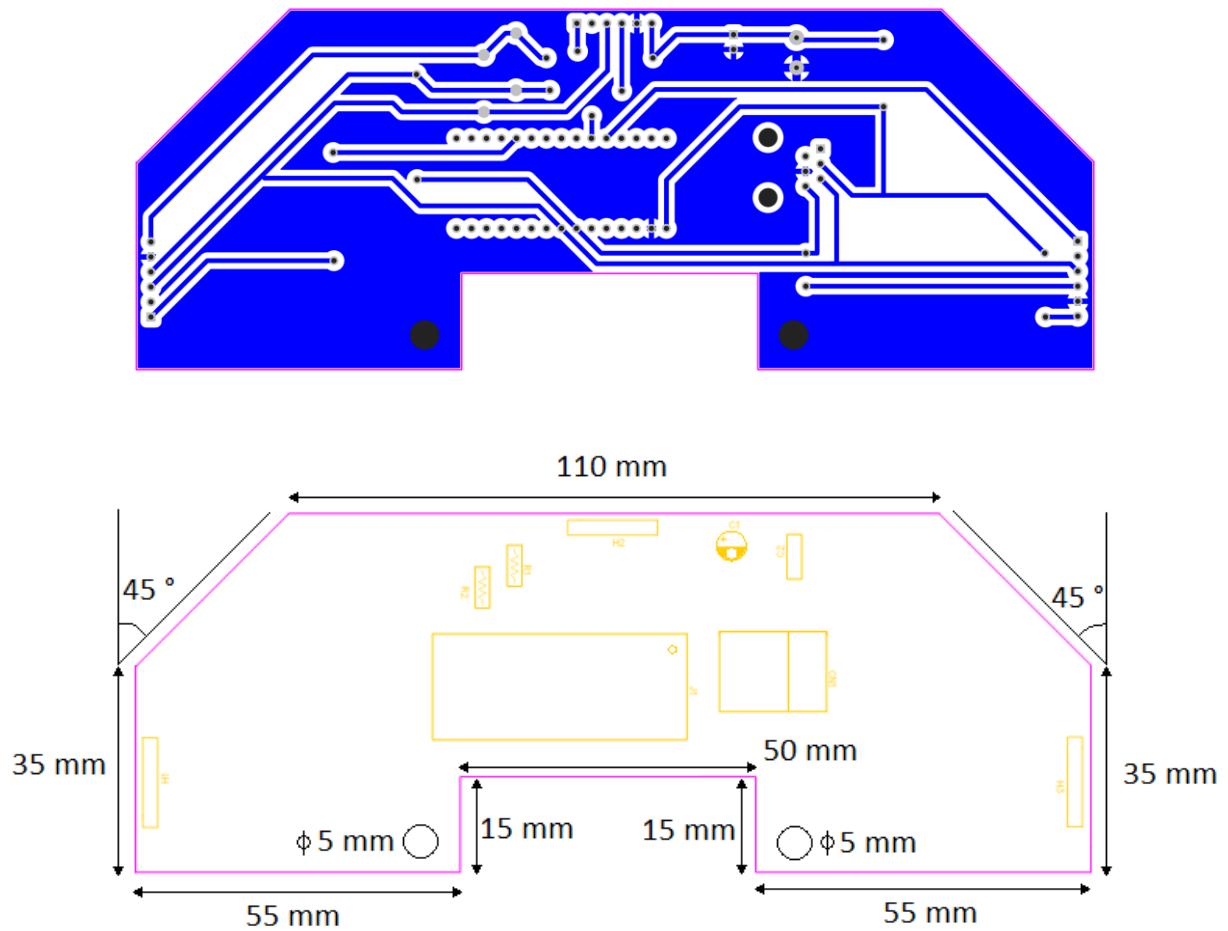
Schéma zapojenia laserového senzového modulu



Obrázok D.1: Schéma zapojenia laserového senzového modulu

Príloha E

Doska plošných spojov laserového senzového modulu



Obrázok E.1: Doska plošných spojov laserového senzového modulu

Príloha F

Zoznam použitých súčiastok

Názov súčiastky	Hodnota	Počet	Popis	
Rezistor	100R 1%	3	THT prevedenie	
	1k 1%	3		
	2k2 1%	1		
	10k 1%	4		
Keramický kondenzátor	100nF / 63 V	2		
Elektrolitycký kondenzátor	22 μ F / 25 V	2		
Tranzistor BC 337-25		1		
RJ12 konektor		2		
Header 2.54_1x6		3		Female PIN header
Header 2.54_1x15		4		
Arduino Nano		1		
TCRT 5000		3		
VL530X		3	Laserový senzor vzdialenosti	

Tabuľka F.1: Zoznam použitých súčiastok

Príloha G

Fotografie robota s výslednými sezorovými modulmi



Obrázok G.1: Fotografia robota so zapojeným infračerveným sezorovým modulom



Obrázok G.2: Fotografia robota so zapojeným laserovým sezorovým modulom