



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A
BIOMECHANIKY**

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

**NÍZKONÁKLADOVÝ SNÍMAČ VZDÁLENOSTI PRO
MOBILNÍ ROBOT ZALOŽENÝ NA SNÍMAČI SRF05**

LOWCOST PROXIMITY SENSOR FOR MOBILE ROBOT BASED ON SRF05 SENSOR

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Pavel Majerčík

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jiří Krejsa, Ph.D.

BRNO 2017

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Student: **Bc. Pavel Majerčík**
Studijní program: Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor: Mechatronika
Vedoucí práce: **doc. Ing. Jiří Krejsa, Ph.D.**
Akademický rok: 2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Nízkonákladový snímač vzdálenosti pro mobilní robot založený na snímači SRF05

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Podstatou práce je aplikace ultrazvukového senzoru SRF05 pro použití v mobilní robotice. K vlastnímu senzoru je nutné vytvořit desku elektroniky, která zabezpečí zpracování signálu ze senzoru a komunikaci s nadřazeným systémem. Součástí práce bude série testů v reálném prostředí a jejich vyhodnocení.

Cíle diplomové práce:

1. Seznámit se se snímačem SRF05
2. Vytvořit desku elektroniky pro zpracování signálu snímače
3. Navrhnout sadu testů pro ověření vlastností snímače
4. Porovnat charakteristiky snímače od různých výrobců
5. Stanovit chování snímače pro různá prostředí, povrchy, atd.

Seznam doporučené literatury:

Charles Platt: Encyclopedia of Electronic Components Volume 3: Sensors, Maker Media, 2016

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Táto diplomová práca sa zaoberá zisťovaním vlastností a charakteristík ultrazvukových snímačov SRF05. Ide o hľadanie faktorov, ktoré skresľujú alebo iným spôsobom ovplyvňujú správne fungovanie týchto senzorov. V prvom rade bolo potrebné naprogramovať čip osadený na doske spracovania signálu pre korektnú funkčnosť a riadenie snímačov. Následne bolo realizovaných niekoľko meraní pre zistenie správania sa snímačov pre rôzne vzdialenosti. Ďalej bolo realizovaných mnoho meraní, ktorých snaha bola získať poznatky o vplyve teploty, svetelných podmienok, materiálu snímaného povrchu alebo mieru vzájomného ovplyvňovania pri použití viacerých snímačov. Poslednou úlohou bolo skúmanie približného tvaru vyžarovaného ultrazvuku pre zistenie oblasti detekcie. Nakoniec sa porovnali senzory SRF05 s inými ultrazvukovými snímačmi od rôznych výrobcov.

Summary

This master's thesis deals with determination of properties of the ultrasonic sensor SRF05. It is about finding factors that distort or have other negative effects in any way on the proper functionality of these sensors. First of all, it was necessary to program a chip mounted on signal processing board for correct functionality and operation of sensors. Then a few sets of measurements were done to determine the behaviour of sensors for different distances. In addition, we had to carry out many more measurements to find out the influence of temperature, light conditions, material of the sensed surface or cross-noise caused by the use of multiple sensors. In the next step, the approximate shape of the transmitted ultrasound was investigated to determine the zone of detection. The last task of this thesis was to compare the SRF05 sensors with other ultrasonic sensors from different manufacturers.

Klíčové slová

ultrazvukový snímač, snímač vzdialenosti SRF05, meranie vzdialenosti, mobilný robot, spracovanie signálu

Keywords

ultrasonic sensor, range finder SRF05, distance measurement, mobile robot, signal processing

Bibliografická citácia

MAJERČÍK, P. *Nízkonákladový snímač vzdálenosti pro mobilní robot založený na snímači SRF05*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 79 s. Vedoucí doc. Ing. Jiří Krejsa, Ph.D.

Prehlasujem, že túto diplomovú prácu na tému *Nízkonákladový snímač vzdálenosti pro mobilní robot založený na snímači SRF05* som vypracoval samostatne pod vedením vedúceho diplomovej práce doc. Ing. Jiřího Krejsu, Ph.D. a s použitím odbornej literatúry a zdrojov uvedených v zozname použitej literatúry.

Bc. Pavel Majerčík

Týmto by som rád poďakoval všetkým, ktorí sa na tejto práci akýmkoľvek spôsobom podieľali, pedagógom VUT v Brne za predávanie vedomostí, bez ktorých by som sa neobišiel, jak pri riešení tejto diplomovej práce, tak aj v budúcom živote. Tak isto ďakujem svojej rodine a priateľom za morálnu podporu. Najväčšie poďakovanie patrí vedúcemu mojej práce doc. Ing. Jiřímu Krejsovi, Ph.D. za cenné poznatky a pripomienky, ktoré ma vždy naviedli správnym smerom. Rád by som sa ešte poďakoval Bc. Janovi Meindlovi za cenné rady pri programovaní.

Bc. Pavel Majerčík

Obsah

1	Úvod	12
1.1	Bender 2	12
1.2	Breach	13
2	Formulácia problému	15
2.1	Analýza problému	15
2.2	Ciele riešenia problému	16
3	Senzorika, snímanie vzdialenosti	17
3.1	Laserové snímače vzdialenosti	17
3.2	Kapacitné snímače vzdialenosti	18
3.3	Ultrazvukové snímače	18
4	Príprava pred meraním	20
4.1	Snímače SRF05	20
4.2	Doska pre spracovanie signálu	22
4.3	Riadiaci program snímačov	22
5	Meranie - zisťovanie vlastností snímačov	26
5.1	Všeobecný popis postupu merania	26
5.2	Prvý súbor meraní - zisťovanie presnosti snímačov pre rôzne vzdialenosti	27
5.2.1	Meranie vzdialenosti 4,5 cm pomocou štyroch snímačov - synchrónne spúšťanie	27
5.2.2	Meranie vzdialenosti 1 m pomocou štyroch snímačov - synchrónne spúšťanie	29
5.2.3	Meranie vzdialenosti 2,01 m pomocou štyroch snímačov - synchrónne spúšťanie	30
5.2.4	Meranie vzdialenosti 3,02 m pomocou štyroch snímačov - synchrónne spúšťanie	32
5.2.5	Meranie vzdialenosti 3,87 m pomocou štyroch snímačov - synchrónne spúšťanie	33
5.2.6	Zhodnotenie prvého súboru meraní	34
5.3	Druhý súbor meraní - zisťovanie miery vzájomného ovplyvňovania snímačov	36
5.3.1	Meranie vzdialenosti 1 m pomocou 4 snímačov za denného svetla - sekvenčné spúšťanie	36
5.3.2	Meranie vzdialenosti 1 m pomocou 4 snímačov za tmy - sekvenčné spúšťanie	37
5.3.3	Meranie vzdialenosti 1 m pomocou 1 snímača	39
5.3.4	Zhodnotenie druhého súboru meraní	40
5.4	Tretí súbor meraní - zisťovanie vplyvu svetla a teploty	40
5.4.1	Prvé zistenie vplyvu slnka (vplyv svetla aj tepla)	41
5.4.2	Overenie merania v tieni aj na slnku	43
5.4.3	Dlhodobé meranie	44
5.5	Štvrtý súbor meraní - upresnenie vplyvu svetla a teploty	46

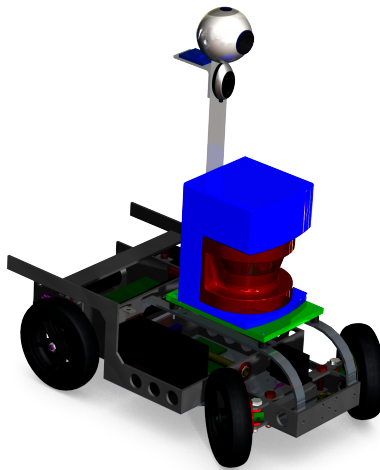
5.5.1	Meranie pri ohriatí používanej sensoriky	46
5.5.2	Meranie so zohriatou sensorikou jej používaním	47
5.5.3	Meranie pri osvetlení snímaného povrchu studeným svetlom - žiarivkou	48
5.5.4	Meranie pri osvetlení snímaného povrchu slnkom	50
5.5.5	Meranie pri zmene podmienok ohrevu pomocou IR svetla	51
5.5.6	Meranie pri zmene podmienok nasvietenia aj ohrevu pomocou IR a UV svetla	52
5.6	Piaty súbor meraní - zisťovanie vplyvu na zmeny materiálu snímanej plochy	54
5.7	Šiesty súbor meraní - zisťovanie vyžarovacieho tvaru snímačov	59
5.8	Siedmy súbor meraní - vzájomné rušenie snímačov pri meraní v rohu	61
5.8.1	Snímanie malej vzdialenosti do 20 cm	61
5.8.2	Snímanie vzdialenosti do 1 m	62
5.8.3	Overenie výsledkov	64
5.8.4	Zhodnotenie vzájomného rušenia snímačov	65
6	Porovnanie SRF05 s inými typmi snímačov	66
6.1	Porovnanie snímačov od firmy Devantech	66
6.2	Porovnanie snímačov od firmy MaxBotix	68
6.3	Porovnanie snímačov od rôznych firiem	71
7	Záver	73
	Zoznam použitej literatúry	75
	Zoznam použitých skratiek a symbolov	77
	Elektronické prílohy na CD	79

1. Úvod

Vývoj technológií prináša nové možnosti a riešenia rôznych problémových situácií. Môžu nimi byť napríklad deaktivácia výbušnín, preskúmanie odľahlých a nebezpečných oblastí pre človeka a podobne. Práve v takýchto prípadoch sa využívajú mobilné roboty. Pomaly ale iste sa stávajú častejšími pomocníkmi, či už to v domácnostiach, priemysle, armáde alebo na miestach kam sa ľudia len tak ľahko nedostanú. Napríklad pri kozmických misiách na Mars pre skúmanie jeho povrchu alebo dneska už pomerne často používané robotické vysávače ako pomocníci v domácnosti. Toto všetko sú príklady použitia mobilných robotov, ktorých však zrejme najväčším problémom je orientácia v priestore respektíve detekcia prekážok v ich ceste.

Pre orientáciu sú dnešné roboty vybavené rôznymi zariadeniami, môže to byť napríklad GPS navigácia, alebo senzory vzdialenosti, či už laserové alebo ultrazvukové. Úlohou tejto práce je oboznámenie sa s ultrazvukovými snímačmi *SRF05*, zistenie ich vlastností a charakteristík pre praktické použitie. Tieto snímače majú možnosť praktickej aplikácie na dvoch robotoch brnianskej firmy *Bender Robotics s.r.o.*. Ide o robotov s označením *Bender 2* a *Breach*. Pri robotovi *Bender 2* by išlo o doplnenie už existujúcej sensoriky, ktorá obsahuje odometriu predných kolies a laserový sick slúžiaci ako predný nárazník. Ultrazvukové senzory by slúžili ako zadný nárazník. Pri robotovi *Breach* by tieto senzory slúžili ako nárazníky zo všetkých strán, teda predný, zadný a bočné.

1.1. Bender 2



Obr. 1.1: Vizuálny model plánovanej zostavy robota Bender 2

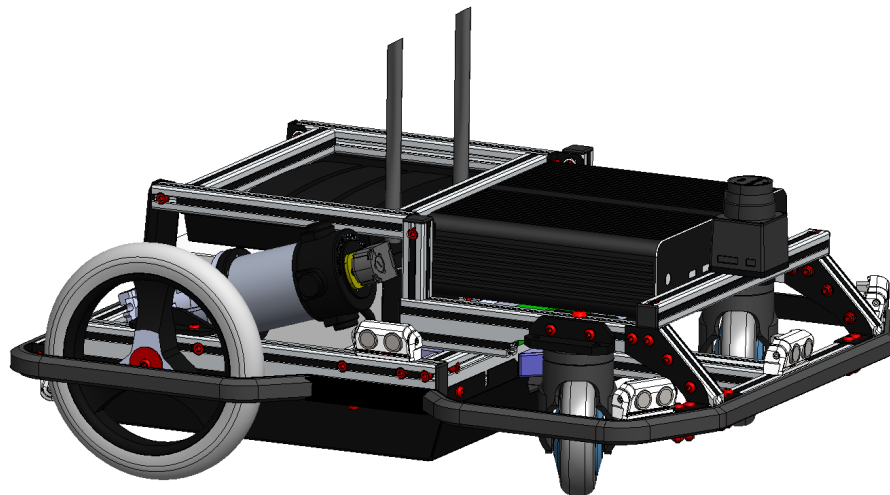
Bender 2 (obr. 1.1) je mobilný robot riadený notebookom, používaný pre vývoj navigačných algoritmov a fúziu dát zo sensorov rôznej podstaty. Pohyb po jednoduchom teréne mu nerobí problém, napríklad mestské parky. Dokáže sa orientovať v priestore a pohybovať sa po vopred určenej trase, bez narážania do prekážok pomocou použitej sensoriky a navigačných algoritmov. Ide o dvojnápravový, štvorkolesový robot, poháňaný dvoma jednosmernými motormi na zadnej náprave. Každý z motorov disponuje výkonom $P = 150\text{ W}$, ktoré sú ovládané zvlášť, čo zaisťuje robotovi stabilitu pri zatáčaní (elek-

tronický diferenciál) - teda nie je potrebný mechanický diferenciál. Pohony sú napájané pomocou dvoch 12 V akumulátorov, ktoré sú súčasťou robota. Predná náprava je riadená servomotorom. Na rám bola požiadavka, aby bol tuhý a ľahký preto je vyrobený z hliníku (obr. 1.2). Robot je dimenzovaný na maximálnu rýchlosť $v_r = 5 \text{ km/hod}$, s rozmermi 575/300/200 mm (d/š/v) a hmotnosťou $m = 20 \text{ kg}$.



Obr. 1.2: Foto rámu Bendra 2 s akumulátormi a jedným DC motorom [13]

1.2. Breach

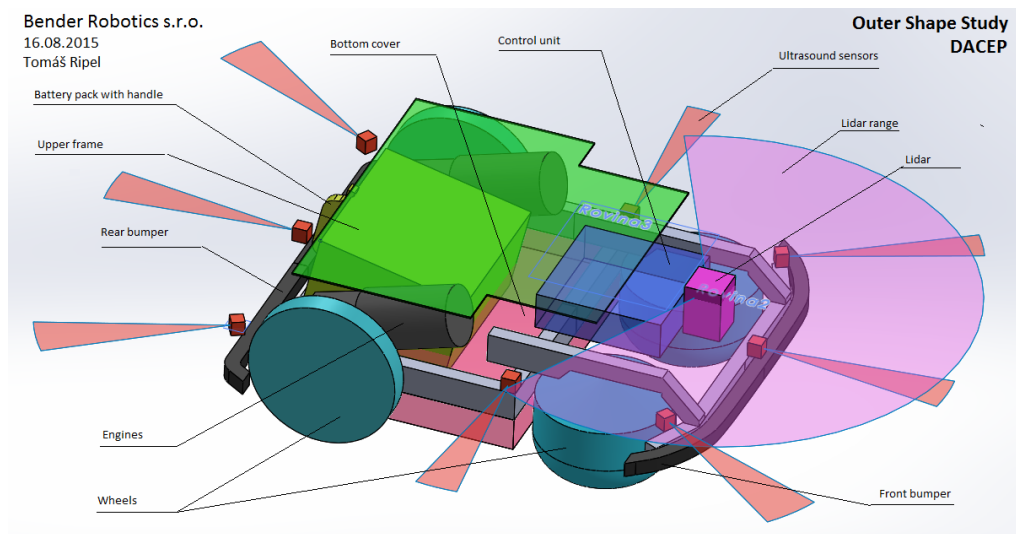


Obr. 1.3: Vizuálny model robota Breach

Breach je taktiež mobilný robot, ktorý je zatiaľ iba vo vývoji, teda jeho presný účel použitia nie je zatiaľ konkrétne špecifikovaný. Dokáže sa orientovať a pohybovať v indoor prostredí, má schopnosť vyhýbať sa prekážkam jak statickým, tak aj dynamickým. Je postavený na diferenciálnom podvozku so závitníkovou prevodovkou. Poháňaný je dvomi jednosmernými motormi, pričom každý z nich disponuje výkonom $P = 120 \text{ W}$. Tieto motory sú riadené zvlášť, vďaka čomu je ovládaný aj smer pohybu. Ako vidieť z obr. 1.3, nemá prednú nápravu, ale namiesto tejto nápravy má dve rotačné kolesá. Napájanie je realizované pomocou dvoch akumulátorov, s napätím $U = 12 \text{ V}$ pre každý z nich. Rozmery robota sú 622/230/540 mm, a so svojou hmotnosťou $m = 25 \text{ kg}$ z čoho unesie

1.2. BREACH

15 kg nákladu a jeho maximálna rýchlosť je $v_r = 2 \text{ km/h}$. Pre orientáciu je vybavený ultrazvukovými snímačmi a lidarom (obr. 1.4), vďaka čomu si dokáže vytvárať vlastnú mapu.



Obr. 1.4: Vizuálny model senzoričky robota Breach

2. Formulácia problému

S prudkým technologickým vývojom v posledných rokoch sa rozvinul aj vývoj robotov, či už mobilných, statických alebo leteckých (drony). Jednou z hlavných požiadaviek na robota je, aby sa vedel orientovať v priestore, vyhýbať sa prekážkam, alebo aspoň zastaviť ak mu niečo bráni v ceste. Pre orientáciu robota sa používajú rôzne senzory, lokalizácia a navigácia pomocou GPS podľa danej mapy, rôzne senzory či už vzdialenosti, alebo prítomnosti určitého objektu, prípadne kamery a následného rozpoznávania obrazu. Zo sensoriky sú často používané laserové senzory, napr. lidar - laserový diaľkomer (obr 2.1). Používa sa pre navigáciu robota alebo pre vytváranie vlastnej mapy. Ďalej sa často používajú ultrazvukové snímače (obr. 2.2), ktoré sú používané napríklad ako "nárazníky", aby robot vedel či je v jeho okolí nejaká prekážka.



Obr. 2.1: Laserový diaľkomer



Obr. 2.2: Ultrazvukový senzor

2.1. Analýza problému

Prvým problémom pri použití ultrazvukových snímačov je spôsob ich riadenia, aby merali presne, a tak často ako je to pre danú aplikáciu potrebné, s ohľadom na limitujúcu frekvenciu snímania f_s daného snímača. Preto je potrebné naprogramovať riadiaci

2.2. CIELE RIEŠENIA PROBLÉMU

čip umiestnený na doske pre spracovanie signálu, ktorý bude riadiť tieto snímače. Ďalej pre dostatočne presnú a dobrú orientáciu robota, je žiadúce poznať vlastnosti a charakteristiky použitých snímačov, ich správanie pri rôznych podmienkach. Je teda potrebné zistiť napríklad, ako ovplyvňuje meranie teplota okolia, svetelné podmienky prostredia, materiál snímaného povrchu, vzájomné ovplyvnenie snímačov - prepočutie a iné. Nasledujúcou požiadavkou je poznať tvar vyžarovaného ultrazvuku - oblasť detekcie, resp. vedieť v akej veľkej oblasti dané snímače dokážu zdetekovať predmet alebo prekážku.

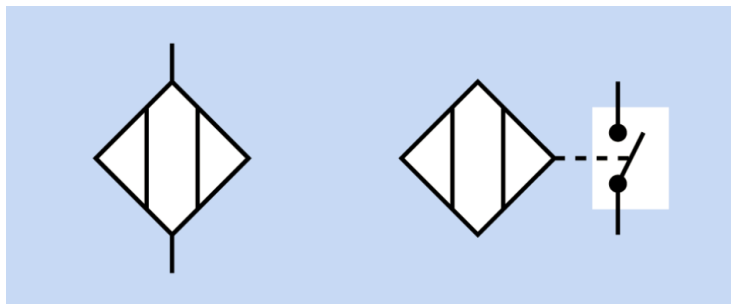
2.2. Ciele riešenia problému

Cieľom riešenia je zistiť vyššie vymenované vlastnosti ultrazvukových snímačov *SRF05*. Potom budú porovnávané vlastnosti snímačov *SRF05* s inými druhmi ultrazvukových senzorov od rôznych výrobcov. A na základe zistených výsledkov sa následne určí či je vhodné vymeniť aktuálnu sensoriku za skúmané snímače z ekonomického a konštrukčného hľadiska.

3. Senzorika, snímanie vzdialenosti

Pojmom snímač (senzor) v technickom zmysle rozumieme zariadenie, ktoré prevádza meranú fyzikálnu veličinu na inú veličinu (najčastejšie elektrický signál) [11]. Tento signál ďalej vieme prenášať a spracovávať meracími a riadiacimi systémami. Môžu to byť mikropočítače, notebooky, riadiace jednotky a pod. Dnes už existuje veľa druhov snímačov, napr. snímače teploty, tlaku, prietoku, sily a momentu, rýchlosti, hmotnosti, vzdialenosti a mnoho ďalších.

Pre meranie vzdialenosti existujú rôzne typy snímačov - laserové, kapacitné a ultrazvukové. Tieto snímače merajú vzdialenosť medzi snímačom a fyzickým objektom, rozsah snímanej vzdialenosti je rádovo od milimetrov (kapacitné) do jednotiek metrov (ultrazvukové a laserové). Výstupom zo snímača môže byť analógový signál (napätie) alebo digitálny bipolárny/unipolárny signál (*PWM*). Bežne používaná schematická značka senzoru vzdialenosti je na obr. 3.1. Okrem robotiky sa senzory používajú aj v alarmových systémoch, automobiloch (parkovacie senzory) alebo ako snímače hladiny tekutín v nádržiach [12].

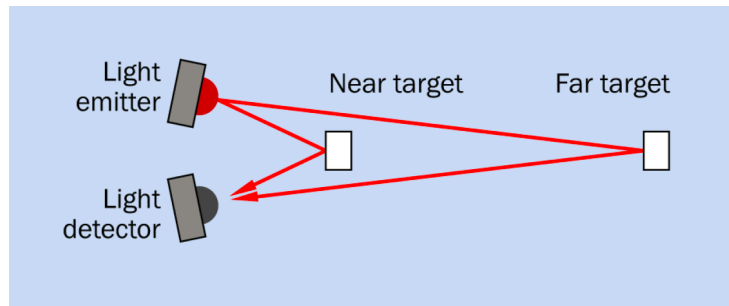


Obr. 3.1: Schematická značka snímača vzdialenosti [12]

3.1. Laserové snímače vzdialenosti

Laserové snímače využívajú lúče infračerveného (*IR*) svetla v úzkom spektre vlnových dĺžok λ , ktoré sú vyžarované LED diódou. Tá môže byť buď súčasťou snímača alebo oddelenou časťou. Laserové snímače ďalej obsahujú aj fotodiódu alebo fototranzistor, ktorý odrazené vyžarované IR svetlo zosníma. Na základe uhlu dopadu odrazeného svetla, elektronika snímača vypočíta snímanú vzdialenosť (obr. 3.2). Vyžarované svetlo býva modulované na frekvenciu, ktorú rozozná snímacia elektronika modulu [12]. Iné typy laserových snímačov zase vypočítavajú vzdialenosť na základe času "letu" laseru, napr. snímače od firmy *SICK*.

3.2. KAPACITNÉ SNÍMAČE VZDIALENOSTI



Obr. 3.2: Princíp fungovania laserových snímačov [12]

3.2. Kapacitné snímače vzdialenosti

Kapacitné snímače vzdialenosti (obr. 3.3), využívajú konduktivitu (vodivosť) G snímaného predmetu alebo povrchu. Na rozdiel od laserových alebo ultrazvukových snímačov nepotrebnú žiadne prídavné zdroje zvuku alebo svetla. Ide o meranie kapacity medzi senzorom a snímaným povrchom, na princípe fungovania kapacity kondenzátoru. Sú používané hlavne v priemysle, pre krátke vzdialenosti do 10 mm vďaka ich vysokej presnosti. Lacnejšie varianty sa používajú skôr ako snímače prítomnosti, či sa daný predmet nachádza v určitom rozsahu alebo nie [12].



Obr. 3.3: Kapacitné snímače vzdialenosti [12]

3.3. Ultrazvukové snímače

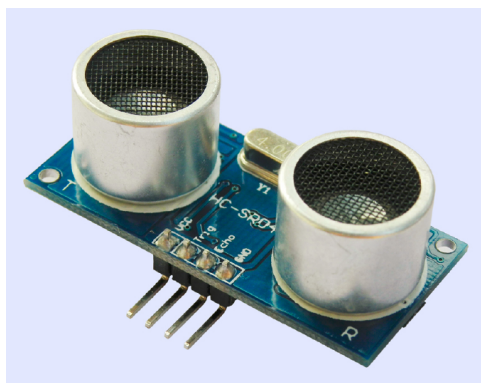
Ultrazvukové snímače fungujú na princípe vysielania ultrazvuku pomocou vysielача. Následne prijímač čaká na odraz (odozvu) vyslaného ultrazvukového signálu od snímaného objektu. Ultrazvuk je generovaný piezoelektrickým meničom (transducerom), na ktorý sa privedie signál reprezentovaný sledom veľmi krátkych impulzov, s frekvenciou ultrazvuku f_u v rozmedzí $30 - 50\text{ kHz}$. Ultrazvukový menič môže plniť dvojitú úlohu, ako vysielач tak aj ako prijímač alebo snímač môže obsahovať dva transducery, jeden na vysielanie signálu a druhý na prijímanie. Snímač sa vždy používa spolu s mikrokontrolérom, ktorý na základe rýchlosti šírenia sa zvuku vo vzduchu v_z vypočíta odmeranú vzdialenosť l . V prípade, že snímač má výstup reprezentovaný pomocou digitálneho signálu, potom dĺžka toho signálu t_e je úmerná odmeranej vzdialenosti. Zvyčajne dĺžka výstupného signálu t_e je v μs , a je potrebné ju vydeliť určitou konštantou, aby sa získala vzdialenosť v cm , prípadne v in (palcoch) alebo iných jednotkách dĺžky. Rozsah vzdialenosti, pre ktorú sú tieto snímače použiteľné, je od približne 2 cm do 5 m . V niektorých prípadoch býva horná

3. SENZORIKA, SNÍMANIE VZDIALENOSTI

hranica rozsahu až 10 m. Reálna ukážka ultrazvukového snímača s jedným meničom je na obr. 3.4 a s dvoma meničmi na obr. 3.5 [12].



Obr. 3.4: Ultrazvukový snímač vzdialenosti s jedným piezoelektrickým transducerom [12]

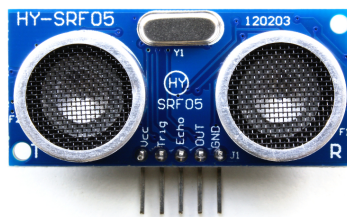


Obr. 3.5: Ultrazvukový snímač vzdialenosti s dvoma piezoelektrickými transducermi [12]

4. Príprava pred meraním

K začatiu praktickej realizácie meraní bolo najprv potrebné naštudovať princíp fungovania ultrazvukových snímačov. Akým princípom sa dajú ovládať, respektíve ako spúšťať meranie. Ďalej bolo nutné naučiť sa aspoň základy programovacieho jazyka C++, keďže pre riadenie snímačov a následné spracovanie signálu sa použila doska kompatibilná s platformou *ARM mbed*, ktorá funguje na spomenutom programovacom jazyku. Následne, keď snímače fungovali a merali správne bolo potrebné navrhnuť sady rozličných meraní pri rôznych podmienkach, z ktorých sa zisťovali vlastnosti senzorov. Nakoniec sa určoval približný tvar vyžarovaného ultrazvuku, resp. sa určovala oblasť detekcie a porovnali sa snímače SRF05 s inými typmi senzorov pracujúceho na rovnakom princípe.

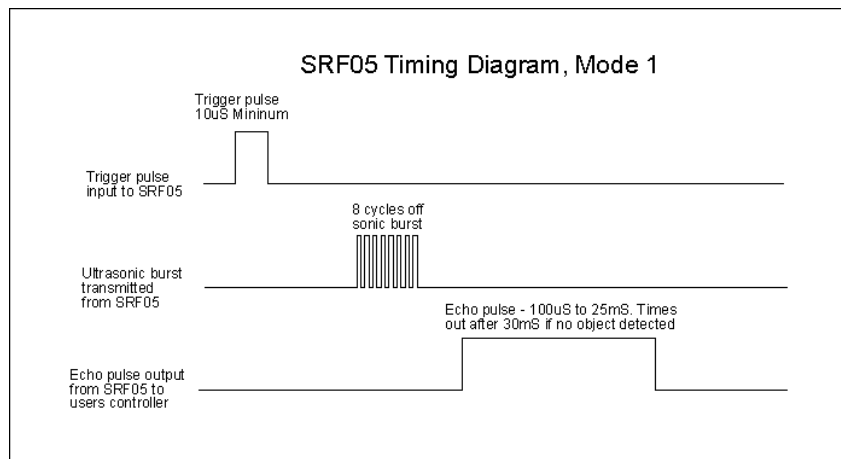
4.1. Snímače SRF05



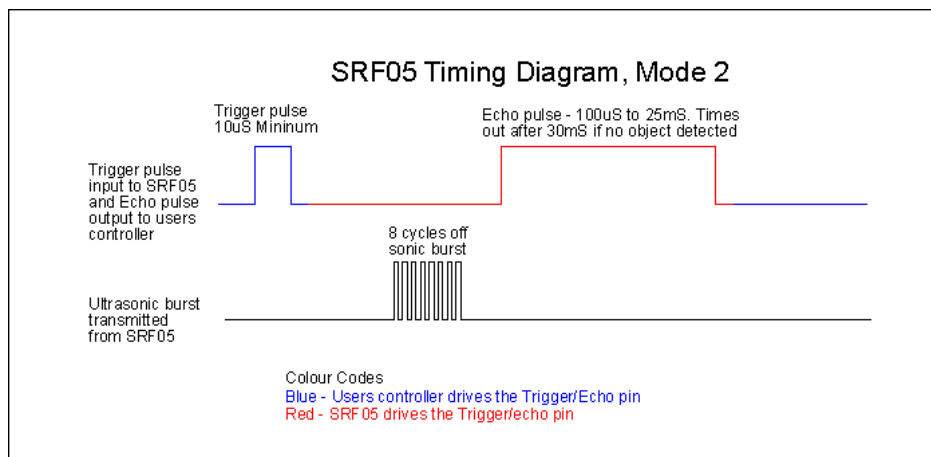
Obr. 4.1: Ultrazvukový snímač SRF05

Po oboznámení sa s fungovaním ultrazvukových snímačov bolo potrebné naštudovať datasheet (technickú dokumentáciu) konkrétneho typu používaných snímačov - *SRF05* (obr. 4.1), aby som bol schopný ich správne zapojiť a naprogramovať dosku pre ich riadenie. Ide o snímače špecifikované a vyrábané ako nízko nákladové, vďaka ekonomickej dostupnosti. Výrobca ich predáva približne po £14 za kus čo odpovedá cca \$20. Táto cena je približne polovičná oproti kvalitnejším snímačom - *SRF08*. Avšak z Číny je možné kúpiť SRF05 výrazne lacnejšie, a to okolo \$1,5 za kus. SRF05 sú vyvinuté z ich predchodcov SRF04, a líšia sa najmä v počte pinov, čo umožňuje zapojiť tieto snímače dvoma rôznymi spôsobmi. SRF05 majú 5 pinov, konkrétne V_{cc} , *trig*, *echo*, *OUT* a *GND* na rozdiel od SRF04, ktorým chýba pin *OUT*. Prvý spôsob zapojenia SRF05 je mód 1, pri ktorom je zapojenie rovnaké ako pri SRF04, a to bez využitia pinu *OUT*. Na pin V_{cc} sa vždy pripája napätie +5 V a pin *GND* sa vždy pripája na spoločnú elektrickú zem. Pin *trig* sa spája s pinom naprogramovaného čipu, ktorým sa riadi a ďalej spracováva meranie. Pre spustenie merania sa na tento pin privádza spúšťač (triggrovací) - digitálny signál, ktorý musí nadobúdať hodnotu 1, a to minimálne po dobu 10 μ s. Tým, že senzor obdrží spúšťač signál, teda dostane pokyn na vyslanie ultrazvuku, ktorého odraz následne očakáva menič pre prijímanie. Senzor pomocou piezoelektrického meniča a analógovo-digitálneho prevodníka (ADC) pretransformuje prijatý odraz ultrazvuku na elektrický signál (výstupný digitálny signál), ktorého dĺžka t_e je úmerná vzdialenosti medzi senzorom a prekážkou. Pre získanie odmeranej vzdialenosti v *cm*, je potrebné vydeliť dĺžku výstupného

signálu t_e [μs] konštantou 58. Ak je požiadavkou získať odmeranú vzdialenosť v in je táto konštanta 148. Na pin *echo* sa takisto pripája pin naprogramovaného čipu, na ktorom sa očakáva výsledný výstupný digitálny signál snímača. Pri použití snímačov SRF05 v móde 2 sa pin *OUT* používa a pripája sa sem taktiež elektrická zem. Avšak pin *echo* sa nepoužíva, zostane teda nepripojený, ale pin *trig* sa využíva jak na spúšťanie merania tak aj na prenos výstupného signálu snímača. Na doske senzoru je ešte ďalších 5 pinov, ktoré sa používajú pri výrobe snímača k naprogramovaniu čipu PIC16F630 slúžiacemu ako pamäť. Po spustení merania snímač čaká maximálne po dobu 30 ms na odraz ultrazvuku buď to na pine *echo*, alebo *trig* (pin pre odraz záleží na použitom móde senzoru). Ak sa odraz ultrazvuku neobjaví do spomenutých 30 ms , senzor nezachytil žiadnu prekážku. Zobrazenie priebehov jednotlivých signálov (spúšťací, vyslanie ultrazvuku a odozva na odrazený ultrazvuk) snímača SRF05, sú zobrazené na obr. 4.2 pre mód 1 a na obr. 4.3 pre mód 2 [3].



Obr. 4.2: Časový priebeh signálov snímača SRF05 - mód 1 [3]

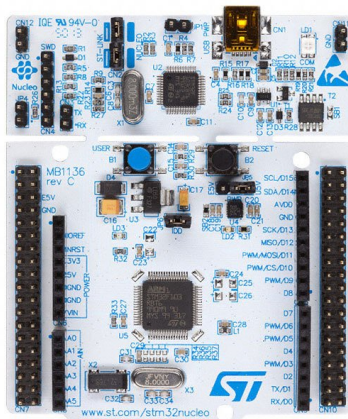


Obr. 4.3: Časový priebeh signálov snímača SRF05 - mód 2 [3]

Merací rozsah snímačov SRF05 od 2 cm do 4 m , a sú schopné snímať vzdialenosť 20-krát za sekundu ($f_s = 20 \text{ Hz}$) [3]. Uhol vyžarovaného ultrazvukového signálu a rozlíšenie snímača neboli uvedené v datasheete, ale na internete sa podarilo nájsť informácie že uhol vyžarovaného ultrazvuku by mal byť menší ako 15° a rozlíšenie by malo byť $\pm 2 \text{ mm}$ oproti SRF04, ktorého rozlíšenie by malo byť o milimeter viac. Snímače boli pri meraní napájané z dosky pre spracovanie signálu.

4.2. Doska pre spracovanie signálu

K pripojeniu, napájaniu snímačov a následnému spracovaniu výstupných signálov zo snímačov sa použila komerčne vyrábaná doska *STM32 NUCLEO-F401RE* (obr. 4.4), ktorá je kompatibilná s vývojovými platformami ako napr. *Arduino* alebo *ARM mbed*. Používa sa pri komunikácii, napríklad medzi riadiacim systémom robota a snímačmi, alebo je priamo riadiacou jednotkou, prípadne na skúšanie a vývoj prototypových zariadení. Jedná sa o STM32 mikrokontrolér s osadením QFP64. Na doske je implementovaný *ST-LINK/V2-1* debugger/programmer s SWD konektorom, ktorý umožňuje komunikáciu zariadení s mikrokontrolérom. Napájanie dosky je realizované cez USB kábel z PC alebo externým zdrojom s napätím 3,3 V; 5 V prípadne 7 – 12 V. Ďalej sú na doske osadené 3 LED diódy, 2 tlačidlá a mnoho vstupných a výstupných pinov. Jedna LED signalizuje zapnutie, druhá je programovateľná podľa potrieb užívateľa a posledná signalizuje USB komunikáciu. Prvé tlačidlo slúži k reštartu bežiaceho programu na doske a druhé je taktiež programovateľné podľa potrieb užívateľa. Z STM32 NUCLEO-F401RE je taktiež možné napájať ďalšie obvody, pretože sú vyvedené konektory s napätím +3,3 V alebo +5 V. Cez USB sú podporované 3 rôzne možnosti, a to využitie virtuálneho COM portu, pamäťového úložiska alebo použitie debuggovacieho portu [15]. Dosku bolo potrebné naprogramovať pre správnu funkčnosť senzorov, aby sa mohli ďalej sledovať a spracovávať výstupné dáta pre zisťovanie vlastností snímačov.



Obr. 4.4: Doska STM32 NUCLEO-F401RE

4.3. Riadiaci program snímačov

Keďže som v programovacom jazyku C++ iba začiatočník, a veľa skúseností som doteraz nezískal, takže sa samozrejme vyskytli nejaké komplikácie. Tieto problémy mi pomáhal prekonať Bc. Jan Meindl, ktorého cenné rady mi veľmi pomohli. Ako ukážku mi poskytol jeho vlastný riadiaci program pre snímače SRF05, ktorý bol pre 6 snímačov, pre použitie s inou doskou pre spracovanie signálu. Jeho program mi nefungoval, ani po úprave kódu pre dosku, ktorú som mal k dispozícii. Takže som napísal nový vlastný riadiaci program, ktorý vychádzal zo vzoru od Bc. Meindla. Riadiaci program snímačov (viď. elektronické prílohy) bol napísaný v online kompilátore platformy *ARM mbed*, ktorá

používa programovací jazyk C++. Kvôli jednoduchosti bude opísaná funkcia programu pre dva snímače.

Na úplnom začiatku programu (riadky 1 a 2) sú príkazom `#define` definované používané knižnice v programe, ktoré sú voľne dostupné a implementované v kompilátore. Knižnica `mbed.h` je základná knižnica `mbed` online kompilátoru, bez ktorej by žiadny program nefungoval. V knižnici `rtos.h` sú definované všetky potrebné funkcie, príkazy a ostatné potrebné knižnice k použitiu *Real Time Operating System* (RTOS), resp. operačného systému bežiaceho v reálnom čase. RTOS je potrebný k praktickej reálnej aplikácii snímačov, pretože budú používané v reálnom čase, ale najmä budú komunikovať s riadiacim systémom v reálnom čase. V celom programe budú používané rôzne premenné, časovače alebo funkcie pomenované vlastným názvom, a za týmto názvom bude vždy uvedené číslo, ktoré určuje k akému konkrétnemu snímaču sa používaná premenná, časovač alebo funkcia vzťahuje.

Na riadku 4 je definovaný digitálny výstup `trig1`, ktorý slúži k vyslaniu spúšťacieho signálu pre snímače cez uvedený pin `PB_8`. Riadky 5 a 6 definujú vstupy prerušenia `echo1` a `echo2` slúžiace na prenos digitálnych signálov reprezentujúcich odrazené ultrazvuky príslušných snímačov cez definované piny na doske `PB_9` a `PA_10`. Definované piny musia byť pripojené k používaným snímačom. Nasledujúce riadky 7 a 8 definujú časovače `t`, ktoré budú neskôr použité k odmeraniu časových dĺžok vstupov prerušenia. Budú merať dobu, počas ktorej výstupné digitálne signály zo snímačov nadobúdajú hodnotu 1. Na riadku 10, príkaz `RawSerial` vytvorí sériový port s pripojenými špecifikovanými pinmi pre vysielanie (USBTX) a prijímanie (USB RX) dát. Riadok 12 definuje premenné `dist1` a `dist2` a ich dátové typy `float`, ktoré sú neskôr používané pre odmeranú vzdialenosť. `Float` je 32 bitový dátový typ, s pohyblivou desatinnou čiarkou, vhodný pre meranie vzdialenosti.

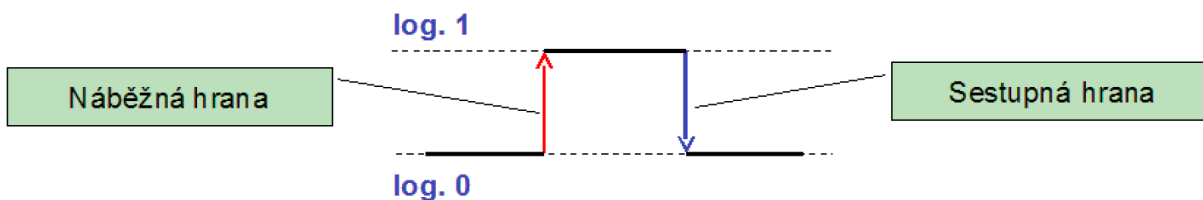
Nasledujúce riadky 14-29 definujú funkcie `rising` a `falling` pre príslušné snímače, a čo sa má pri ich zavolaní vykonať. Funkcie `rising` a `falling` budú volané neskôr v hlavnej funkcii programu, avšak čo majú vykonať opíšeme teraz. Funkcie `rising` používajú časovače definované na prvých riadkoch programu. Po zavolaní týchto funkcií v hlavnej funkcii, sa príslušné časovače ku každej funkcii zresetujú, teda vymažú aktuálnu hodnotu, a znovu sa spustia. Následne sa funkcia ukončí a hlavná funkcia pokračuje ďalej, avšak časovače stále bežia. Po zavolaní funkcií `falling` sa zase tieto časovače zastavia a na základe odmeraných časov sa prepočíta zosnímaná vzdialenosť a následne sa zapíše do príslušných premenných, čím sa tieto premenné inicializujú. Odmerané časy sa čítajú v mikrosekundách (μs) a delia konštantou 58, aby sa výsledná vzdialenosť dostala v centimetroch, ako vyplýva z datasheetu snímačov. Potom sa funkcie `falling` ukončia.

Na riadkoch 33-51 je definovaná funkcia `blink` s ukazovateľom nešpecifikovaného typu. Funkcia `blink` je neskôr volaná v hlavnej funkcii programu ako vlákno, a obsahuje nekonečnú `while` slučku pretože argumentom je hodnota `true`, teda pravda, ktorá nie je nikdy zmenená, takže sa funkcia bude vykonávať stále dookola pri jej zavolaní. V tejto slučke je ďalej vykonané spustenie snímačov, a to konkrétne na riadkoch 35-38, kde je inicializovaný digitálny výstup `trig1` na hodnotu 1 a ktorá sa preniesie cez definovaný pin pripojený k pinom `trig` používaných snímačov. Premenná `trig1` je inicializovaná, RTOS čaká dobu 1 `ms` a `trig1` je znovu inicializovaná na hodnotu 0. RTOS opäť čaká dobu 250 `ms`. Funkcia "Thread::wait" je definovaná v RTOS knižnici, a hovorí nech sa čaká stanovená doba, počas ktorej čip môže vykonávať ďalšie riadky kódu. Thread je definovaný pre RTOS v jeho knižnici, a umožňuje definovať, vytvárať a riadiť funkcie vlákien v systéme (programe). Na riadkoch 40 a 41 je definované, že ak je odmeraná vzdialenosť väčšia ako 1000 `cm`,

4.3. RIADIACI PROGRAM SNÍMAČOV

tak sa uloží do pamäte s hodnotou 999 *cm*, inak sa uloží skutočná odmeraná vzdialenosť. Tieto dva riadky sú uvedené v programe, pretože snímače by mali merať vzdialenosti len do 4 *m*, tak aby sa vyhlo zle odmeraným vzdialenostiam, resp. chybným meraniam kedy snímače odmerali nereálne dlhú vzdialenosť. Riadok 43 vytvára pole *val* dátového typu *char* so 100 bunkami, a zároveň ho aj inicializuje hodnotami 0. *Char* je 8 bitový dátový typ definovaný bez znamienka. Na riadku 45 príkaz *sprintf* prevedie a uloží uvedené premenné *dist1* a *dist2* dátového typu *float* do zásobníka (v našom prípade vytvorené pole) s dátovým typom *string* (reťazec). Na riadkoch 47 a 49 sa tento reťazec pomocou premennej *pc* preniesie do PC, kde sa zapisujú namerané vzdialenosti do textového súboru pomocou softwaru Realterm. Následne sa znovu čaká doba 750 *ms*, počas ktorej môže čip opäť vykonávať ostatné riadky kódu.

Na riadkoch 53-65 je definovaná hlavná funkcia programu *main*. V tejto funkcii sa nastaví špecifická modulačná rýchlosť na 9600 *Bd* (*baud*), pri ktorej pracujú snímače aj doska pre spracovanie signálu. Následne sa zavolá a vykoná vlákno s argumentom *blink*, čo je vlastne vyššie vytvorená funkcia. Na riadkoch 56 a 58 sú volané funkcie *rising* a na riadkoch 57 a 59 sa analogicky volajú funkcie *falling*. Funkcie *rising* sú volané a vykonávané v momente, kedy sa na definovaných pinoch pre vstupy prerušenia objaví nábežná hrana signálu a analogicky funkcie *falling* sú volané a vykonávané v momente, kedy sa objaví na definovanom pine zostupná hrana signálu. Čo je to nábežná a zostupná signálu je zrejme z obr.4.5.



Obr. 4.5: Ukážka nábežnej a zostupnej hrany signálu [1]

Keď na pin priradený vstupu prerušenia sa privedie zo snímača signál, v momente objavenia nábežnej hrany je volaná funkcia *rising*, ktorá zresetuje daný časovač a znova spustí. Následne sa funkcia *rising* ukončí a program ďalej pokračuje na riadku, kedy sa zavolala funkcia *rising*. Následne v momente, kedy sa objaví zostupná hrana signálu, tak je zavolaná funkcia *falling*, ktorá vykoná vypnutie príslušného časovača a prepočíta odmeranú vzdialenosť, ktorou inicializuje príslušnú premennú *dist*. Ďalej je v hlavnej funkcii *main* opäť nekonečná *while* slučka, aby sa táto funkcia vykonávala stále dookola počas merania.

Spôsob fungovania tohto programu by som nazval meranie so "synchronným spúšťaním", keďže sa využíva jedna premenná *trig1*, pre vyslanie spúšťacieho signálu obom snímačom (piny *trig* oboch sensorov sú pripojené k definovanému pinu dosky pre digitálny výstup, cez ktorý sa vysiela spúšťací signál merania). Pri meraniach bol používaný tento program, prípadne trochu upravené časy čakania. Ale takisto bolo potrebné aj meranie so "sekvenčným spúšťaním". To sa líši iba v tom, že sa použila ďalšia premenná napr. *trig2* pre samostatné spúšťanie merania druhým snímačom. Táto premenná by bola definovaná taktiež ako digitálny výstup a inicializovaná rovnakým spôsobom ako *trig1*, len rozdiel je v ich použití. Keď sa prvému snímaču vyslal spúšťací signál, tak sa počkalo zadefinovaný čas aby odmeral vzdialenosť, a až následne sa spustilo meranie ďalším sensorom. Týmto sme sa chceli vyhnúť vzájomnému ovplyvňovaniu (prepočutiu) snímačov. Prepočutie sní-

4. PRÍPRAVA PRED MERANÍM

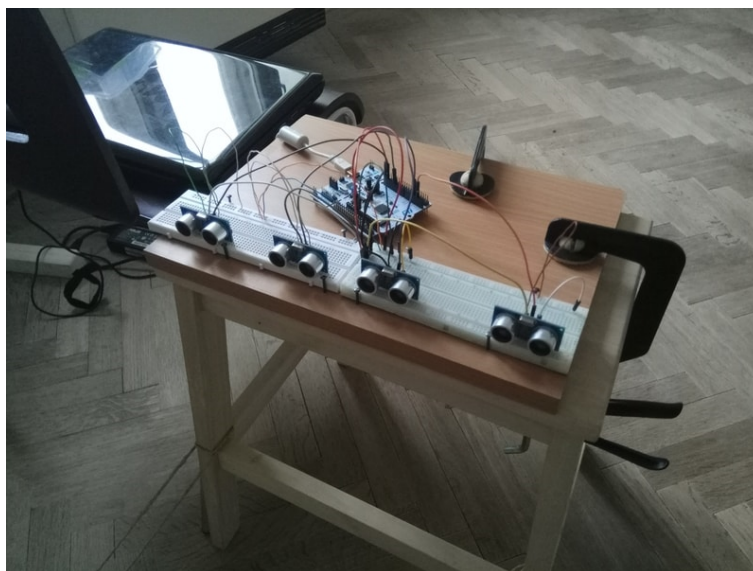
mačov je nežiadúci jav, ktorý sa môže vyskytnúť pri použití viacerých ultrazvukových snímačov spúšťaných synchronne. Ide o prijatie odrazeného ultrazvuku, ktorý vyslal iný senzor.

Program pre viac snímačov vyzerá veľmi podobne, len sa používa viac časovačov, pinov pre vstupy prerušenia spolu s premennými *echo*, pinov pre digitálne výstupy spolu s premennými *trig*, premenné *dist*, funkcie *rising* a *falling* a použijú sa analogicky ako v opísanom programe.

5. Meranie - zisťovanie vlastností snímačov

Jednotlivých meraní pomocou snímačov SRF05 bolo vykonaných mnoho. Líšili sa počtom použitých snímačov, spôsobom spúšťania merania (synchronne alebo sekvenčné), ďalej sa menili podmienky merania (napr. svetelné, teplotné alebo materiál snímaného povrchu). Pre stručnosť bude opísaných iba sedem najpodstatnejších a najdôležitejších súborov meraní, z ktorých sa jednoznačne zistili vplyvy na meranie alebo sa vyvrátili predpokladané príčiny týchto vplyvov.

5.1. Všeobecný popis postupu merania



Obr. 5.1: Fotografia vyhotovená pred meraním, pripojenie 4 snímačov k doske STM32 NUCLEO-F401RE

Realizácia jednotlivých meraní prebiehala tak, že sa vždy určil počet snímačov, ktorými sa bude dané meranie vykonávať. Následne sa napísal resp. upravil riadiaci program pre daný počet snímačov, definovali sa v programe piny, ktoré budú využívané na komunikáciu medzi doskou a senzormi. Snímače sa osadili do kontaktného poľa, prepojili sa jednotlivé piny snímačov s definovanými pinmi dosky *STM32 NUCLEO-F401RE* a kontaktmi pre napájanie. Táto doska sa potom pripojila k PC cez USB kábel, čo zároveň slúžilo aj ako napájanie celého obvodu. Pre komunikáciu medzi doskou a PC sa použil, už vyššie spomínaný freeware software *Realterm*. Tento software je program špeciálne navrhnutý pre komunikáciu a riadenie/ladenie binárnych a iných dátových tokov. V programe *Realterm* sa musel nastaviť správny COM port, cez ktorý komunikuje s doskou a nastaviť príslušný baudrate aký bol definovaný v riadiacom programe. Snímače osadené v kontaktnom poli, boli umiestnené na podstavci približne v 70 cm výške a spustilo sa meranie. Merania trvali vždy rôzne dlhé časové intervaly, ktoré sa stanovovali na základe odhadovanej potreby pre zistenie skúmaného vplyvu. Po ukončení merania boli namerané dáta spracovávané pomocou softwaru *MATLAB*. Z nameraných dát sa sledovali a vypočítavali

štatistické veličiny rozptyl merania jednotlivých snímačov σ_i^2 a aritmetický priemer merania vzdialenosti \bar{l}_i , kde i značí jednotlivé snímače pri každom meraní. Pre vizuálnu ukážku umiestnenia a zapojenia snímačov boli uvedené fotografie v tejto podkapitole - obr. 5.1 a obr. 5.2.



Obr. 5.2: Fotografia merania v rohu miestnosti pomocou dvoch snímačov

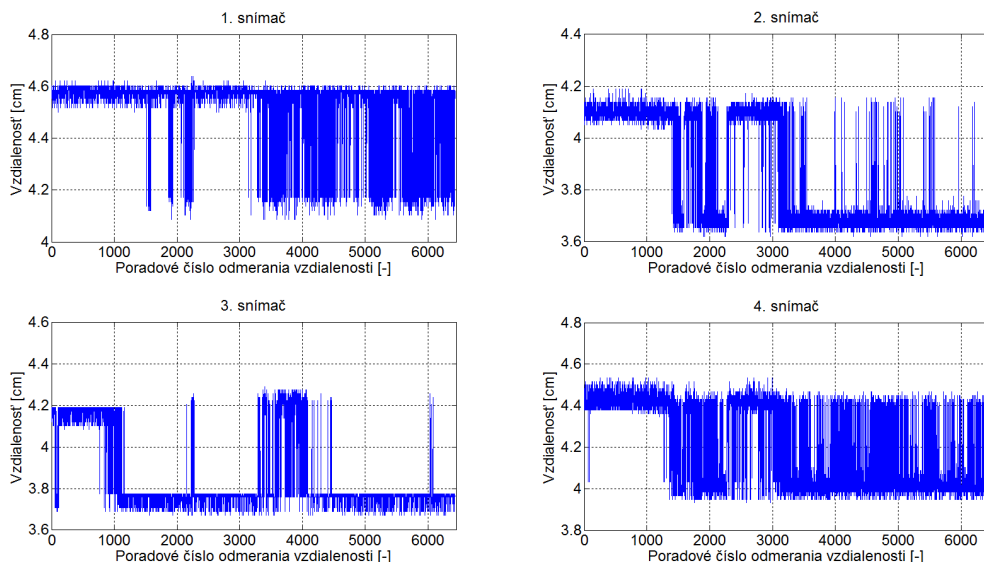
5.2. Prvý súbor meraní - zisťovanie presnosti snímačov pre rôzne vzdialenosti

Prvé merania boli realizované rovnako ako opísaný všeobecný postup. Pre meranie sa použili 4 kusy snímačov. Teda riadiaci program obsahoval 4 premenné *dist*, časovače *t*, funkcie *rising* a *falling* a vstupy prerušenia *echo*. Jedným z cieľov tohto merania bolo získať prvé poznatky ako sa vôbec snímače správajú, či merajú správne v ich meracom rozsahu, zistiť rozptyl z nameraných dát a ich rozdelenie. Avšak hlavným cieľom bolo zistiť to, ako sa líši presnosť merania v závislosti na meranej vzdialenosti *l*. Snímaných vzdialeností *l* bolo dokopy päť, na hraniciach meracieho rozsahu (spodná aj horná hranica) a následne vo vzdialenostiach po 1 metri, konkrétne 4,5 cm, 1 m, 2,01 m, 3,02 m a 3,87 m. Doba snímání *t_s* každého jedného merania z prvého súboru bola približne 105 minút, s použitím synchronného spúšťania (teda program obsahoval iba jeden definovaný digitálny výstup *trig* frekvenciou snímání vzdialenosti $f_s = 1 \text{ Hz}$ (teda jedenkrát za sekundu). Jednotlivé odmerané vzdialenosti sa zapisovali do textového súboru, aby bolo možné namerané dáta následne spracovávať.

5.2.1. Meranie vzdialenosti 4,5 cm pomocou štyroch snímačov - synchronné spúšťanie

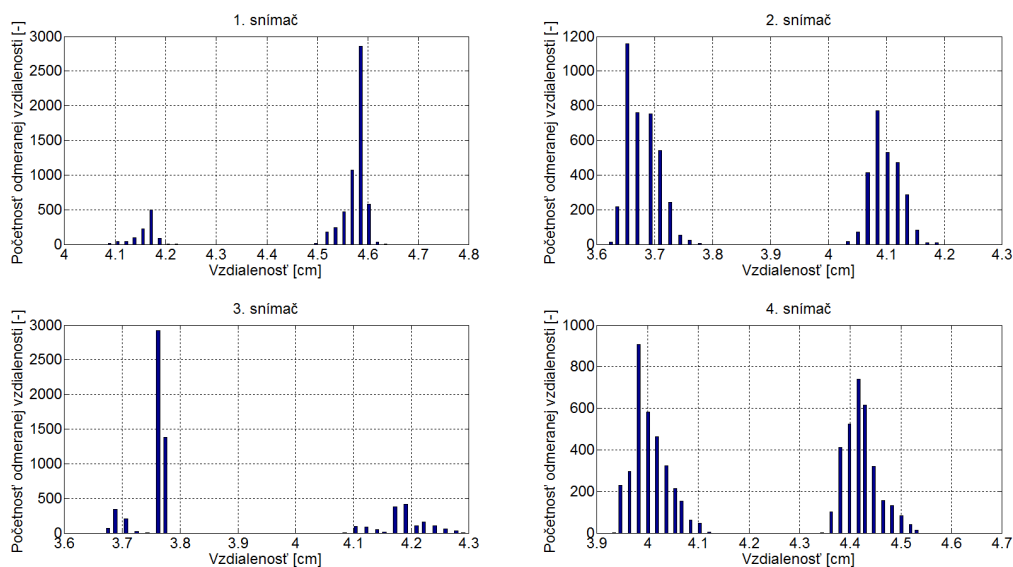
Namerané dáta snímání vzdialenosti $l = 4,5 \text{ cm}$ sú na obr. 5.3, z ktorého je zrejmé, že všetky snímače pri tak krátkej vzdialenosti merajú prevažne len hodnoty v dvoch intervaloch dĺžok, ktoré boli pre každý snímač odlišné. Postupne odmerané vzdialenosti, počas

5.2. PRVÝ SÚBOR MERANÍ- ZISŤOVANIE PRESNOSTI SNÍMAČOV PRE RÔZNE VZDIALENOSTI



Obr. 5.3: Namerané dáta pomocou 4 snímačov pri meraní vzdialenosti 4,5 cm

celého merania sa pohybovali vždy v jednom z dvoch intervalov dĺžok. Namerané dáta boli ovplyvnené šumom, ktorý je zrejme spôsobený A/D prevodníkom osadeným na doske snímača. Meranie by sa dalo prehlásiť za presné, keďže snímače odmerali vždy správnu vzdialenosť v rámci stanovenej tolerancie $\pm 0,5 \text{ cm}$. Keďže aj kontrolné meranie vzdialenosti pomocou vysúvacieho metra sa nedá odmerať úplne presne na milimeter, a z princípu fungovania ultrazvukových snímačov nemusia vždy odmerať rovnakú vzdialenosť, keďže táto je prepočítavaná z prejdenej dráhy ultrazvuku a rýchlosti zvuku vo vzduchu. Ďalším faktorom je to, že vzhľadom k rozmerom používaných robotov, na ktorých by mohli byť SRF05 použité, je $0,5 \text{ cm}$ zanedbateľná dĺžka.



Obr. 5.4: Histogramy nameraných dát pri meraní vzdialenosti 4,5 cm

Rozdelenia nameraných dát jednotlivých snímačov sú na obr. 5.4, z ktorých je vidieť spomínané dva dĺžkové intervaly odmeraných vzdialeností pri každom snímači. Ak

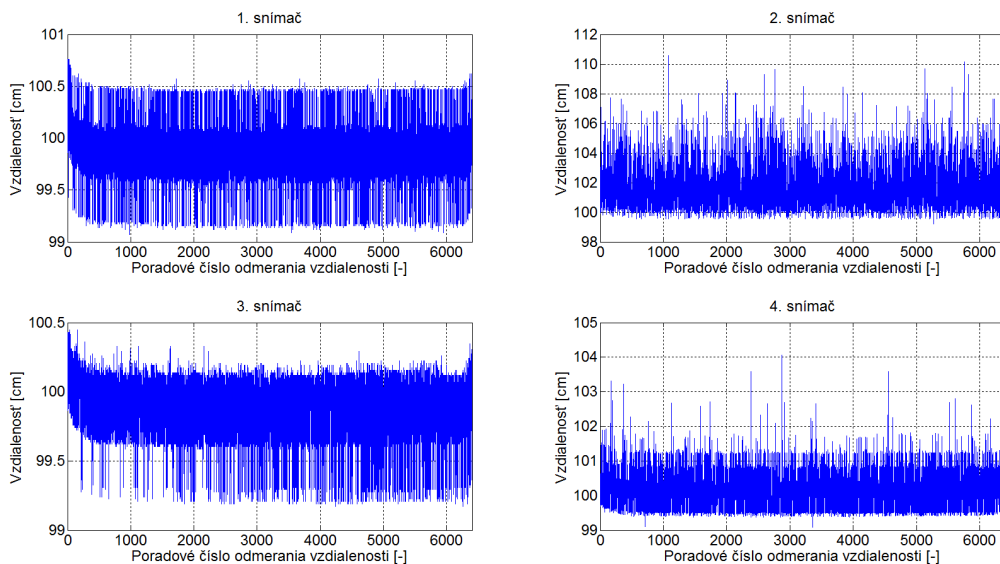
by sa pre jednotlivé snímače brali do úvahy dĺžkové intervaly zvlášť, tak ich rozdelenia pre snímače 2 a 4 sú relatívne blízke Gaussovému rozdeleniu. Priemerné hodnoty odmeraných vzdialeností jednotlivých snímačov spolu s ich rozptylmi budú uvedené v tabuľke 5.1 pri zhodnotení prvého súboru meraní v kapitole 5.2.6.

5.2.2. Meranie vzdialenosti 1 m pomocou štyroch snímačov - synchronne spúšťanie

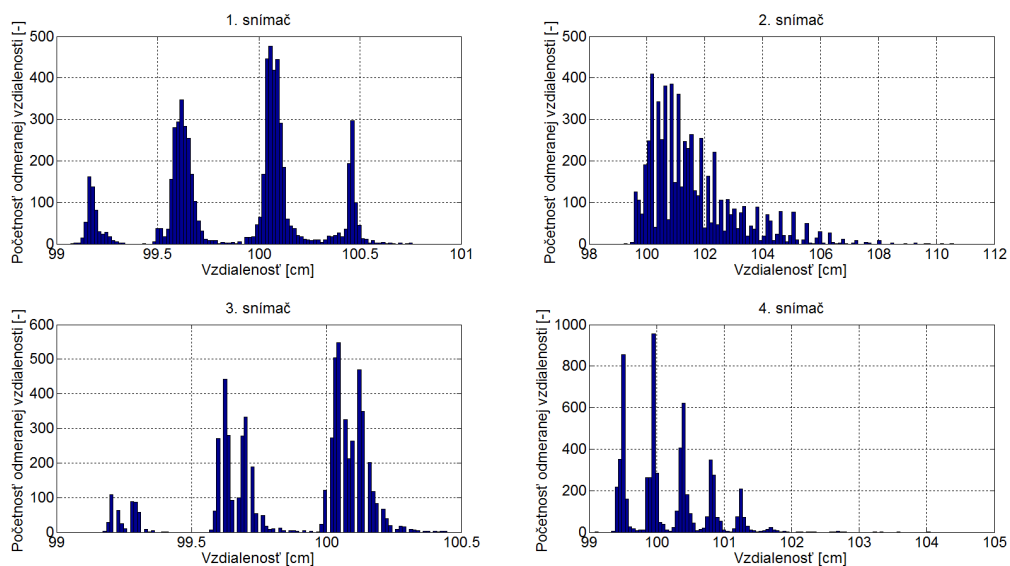
Nasledovalo meranie vzdialenosti $l = 1 \text{ m}$, ktorého namerané dáta sú na obr. 5.5. Je vidieť, že pri snímačoch 1, 3 a 4 sa vyskytol jav, kedy snímače od začiatku merania snímali zdanlivo presnú hodnotu vzdialenosti, ale po určitom čase, sa hodnoty ustálili na nižšej (prípadne vyššej) odmeranej hodnote. Tento jav som nazval časovou konštantou (ČK) snímača τ , ktorá sa vyskytuje zatiaľ z neznámych dôvodov, avšak bude snaha v ďalších meraniach prísť na dôvod jej výskytu. Pri tomto meraní trvali časové konštanty približne 8 minút (po cca 500. odmeranie vzdialenosti) a mali klesajúcu tendenciu. ČK sa pravdepodobne vyskytla aj pri snímači 2, ale nakoľko jeho namerané dáta snímača sú dosť rozmanité - nepresné, jej prítomnosť nie je jednoznačná. Odhadom čo mohlo spôsobiť výskyt ČK, je vplyv teploty, teda to že sa začalo merať keď snímače mali izbovú teplotu a počas merania sa ohriali. Snímače 1 a 3 merali približne presne, rádovo $\pm 1 \text{ cm}$, čo považujeme za prijateľné vzhľadom k tomu, že priemerná hodnota odmeranej vzdialenosti \bar{l}_i je takmer rovnaká so skutočnou meranou vzdialenosťou l a taktiež vzhľadom k dôvodom uvedeným pri predchádzajúcom meraní. Interval $\pm 1 \text{ cm}$ od priemernej hodnoty merania vzdialenosti \bar{l}_i nazveme intervalom tolerancie merania I , a jasne stanovíme jeho limity a to $\pm 1 \text{ cm}$ z priemernej odmeranej vzdialenosti l_i . Teda pri priemernej odmeranej vzdialenosti $l_i = 1 \text{ m}$ bude interval tolerancie $I = (99, 101) \text{ cm}$. Pri pohľade na namerané dáta snímačov 2 a 4 je zrejmé, že merali nepresnejšie. Pri snímači 2 je nepresnosť zjavne výrazná. Už priemerná odmeraná vzdialenosť l_2 sa líši o $1,5 \text{ cm}$ od skutočnej vzdialenosti, a navyše sa vyskytlo presne 3134 nepresne odmeraných vzdialeností z celkového počtu 6399, ktoré sa nachádzajú mimo interval tolerancie (v rozsahu od $-1,5 \text{ cm}$ pod spodnou hranicou intervalu až do $+8 \text{ cm}$ nad hornú hranicu intervalu). Pri snímači 4 nepresnosť nebola až tak výrazná (iba do $+3 \text{ cm}$ od l_4), keďže iba zopár hodnôt leží mimo interval tolerancie. Príčina nepresného merania pomocou snímača 2 je pravdepodobne nesprávne osadenie senzoru do kontaktného poľa (senzor pravdepodobne nebol osadený kolmo k zemi, ale trochu naklonený), a ďalej meranie ovplyvnilo zrejme aj vzájomné ovplyvnenie snímačov (prepočutie), keďže snímače fungujú na *Dopplerovom jave*, a teda merajú dobu od vyslania ultrazvuku, až kým sa odrazené ultrazvukové vlny nevrátia k snímaču, a na základe času sa vypočíta vzdialenosť.

Histogramy nameraných dát jednotlivých snímačov sú na obr. 5.6, z ktorých je vidieť že každý snímač meral prevažne 3-4 intervaly dĺžok. Pri snímačoch 1, 3 a 4, ak by sa uvažoval každý interval dĺžok samostatne, tak takmer pri všetkých by rozdelenie ich dát bolo blízke svojim tvarom Gaussovému rozdeleniu. Ako bolo spomenuté, keďže snímač 2 meral pomerne nepresne, tak aj rozdelenie nameraných dát je ťažké určiť z histogramu, pretože je veľmi rozmanitý. Rovnako ako pri predchádzajúcom meraní, sledované štatistické veličiny budú uvedené v tabuľke 5.1, pri zhodnotení prvého súboru meraní v podkapitole 5.2.6.

5.2. PRVÝ SÚBOR MERANÍ- ZISŤOVANIE PRESNOSTI SNÍMAČOV PRE RÔZNE VZDIALENOSTI



Obr. 5.5: Namerané dáta zo 4 snímačov pri meraní vzdialenosti 1 m



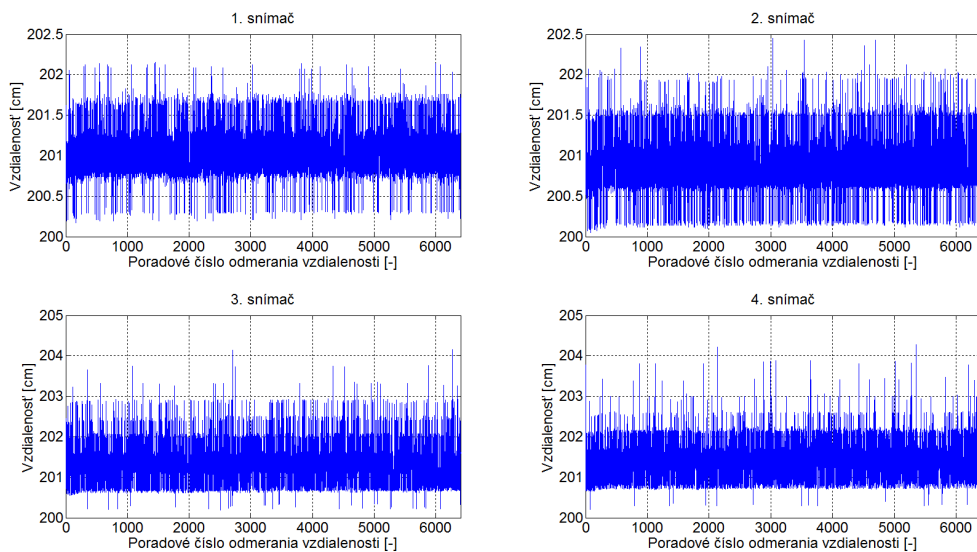
Obr. 5.6: Histogramy nameraných dát pri meraní vzdialenosti 1 m

5.2.3. Meranie vzdialenosti 2,01 m pomocou štyroch snímačov - synchronne spúšťanie

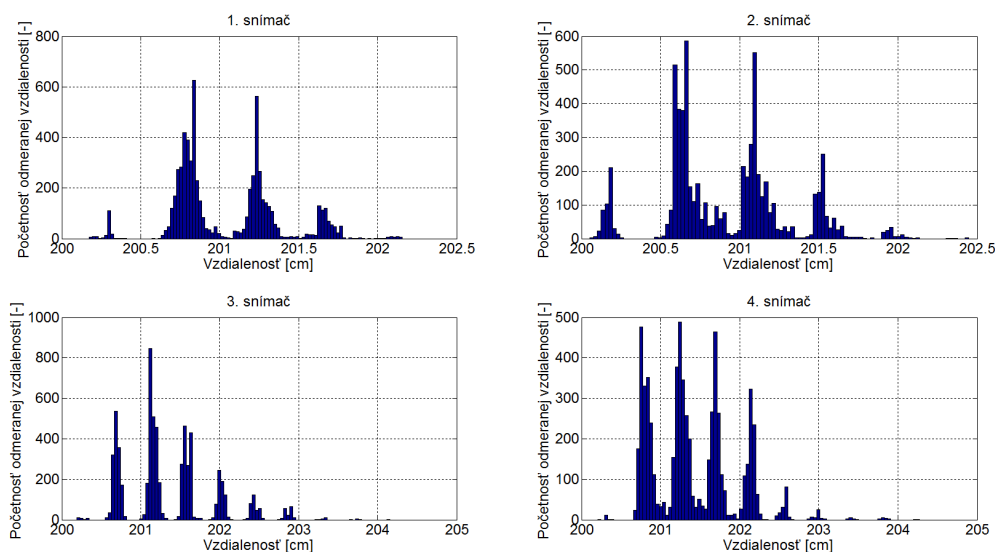
Ďalším meraním bolo snímanie vzdialenosti $l = 2,01 \text{ m}$, ktorého namerané dáta sú na obr. 5.7. Je vidieť, že časová konštanta τ sa znova objavila s rastúcim trendom, a to pri snímačoch 1, 2 a 3. Jej trvanie bolo takisto zhruba 8 minút, čo odpovedá dobe od začiatku merania po približne 500-té opakovanie snímania vzdialenosti. Predpoklad vzniku ČK je rovnaký ako pri meraní vzdialenosti $l = 1 \text{ m}$, konkrétne ohriatie senzorky. Snímače pri tomto meraní merali pomerne presne, avšak pri každom snímači sa vyskytlo niekoľko odmeraných vzdialeností (rádovo sa jedná o desiatky, prípadne stovky odmeraní) mimo intervalu tolerancie I . Pri snímači 1, ide o 33 nepresných odmeraní vzdialenosti s nepresnosťou do $+2 \text{ mm}$ mimo intervalu tolerancie, a ide o najpresnejší snímač tohoto

5. MERANIE - ZISŤOVANIE VLASTNOSTÍ SNÍMAČOV

merania. Pri zvyšných snímačoch sa počet nepresných odmeraní vzdialeností pohyboval rádovo v stovkách 112-540, s nepresnosťami od -2 mm až do $+2\text{ cm}$ mimo intervaly tolerance príslušných snímačov. Hodnoty aritmetických priemerov odmeraných vzdialeností jednotlivých snímačov \bar{l}_i sú uvedené v tabuľke 5.1 pri zhodnotení prvého súboru meraní v podkapitole 5.2.6 spolu s rozptylmi σ_i^2 , a výrazne sa nelíšili od skutočnej odmeranej vzdialenosti.



Obr. 5.7: Namerané dáta zo 4 snímačov pri meraní vzdialenosti 2,01 m

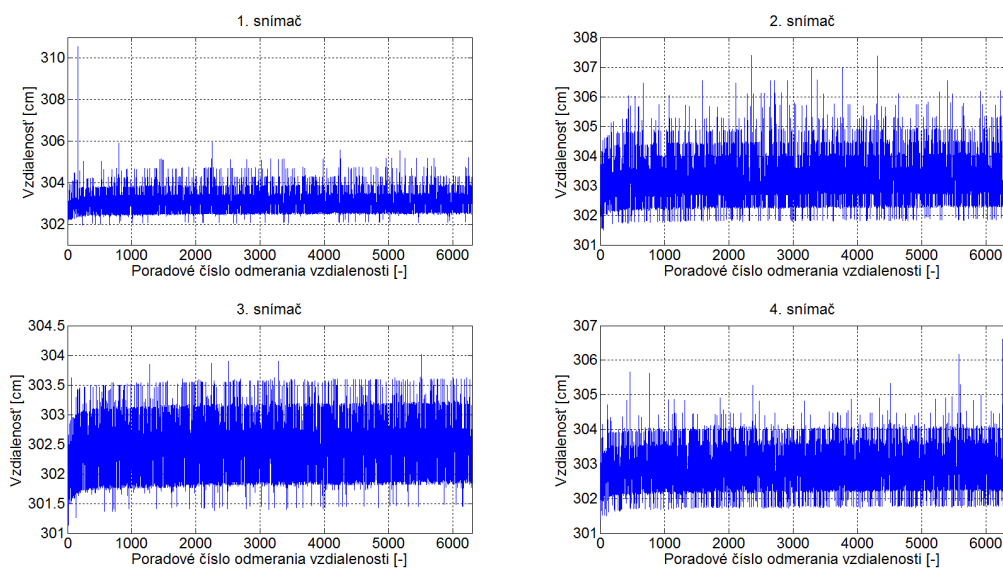


Obr. 5.8: Histogramy nameraných dát pri meraní vzdialenosti 2,01 m

Rozdelenia nameraných dát jednotlivých snímačov sú na obr. 5.8, a je vidieť že snímače aj pri tomto meraní odmerali niekoľko intervalov dĺžok s rozličnými šírkami. Z histogramov je jasne vidieť, že pri snímačoch 1 a 2 sa veľmi veľká väčšina odmeraných vzdialeností nachádza v okolí $\pm 0,5\text{ cm}$ od snímanej vzdialenosti $l = 201\text{ cm}$. Snímače 3 a 4 majú taktiež túto vlastnosť, avšak mnoho odmeraní sa nachádza aj v odľahlejších intervaloch dĺžok, ktoré sú nepresné.

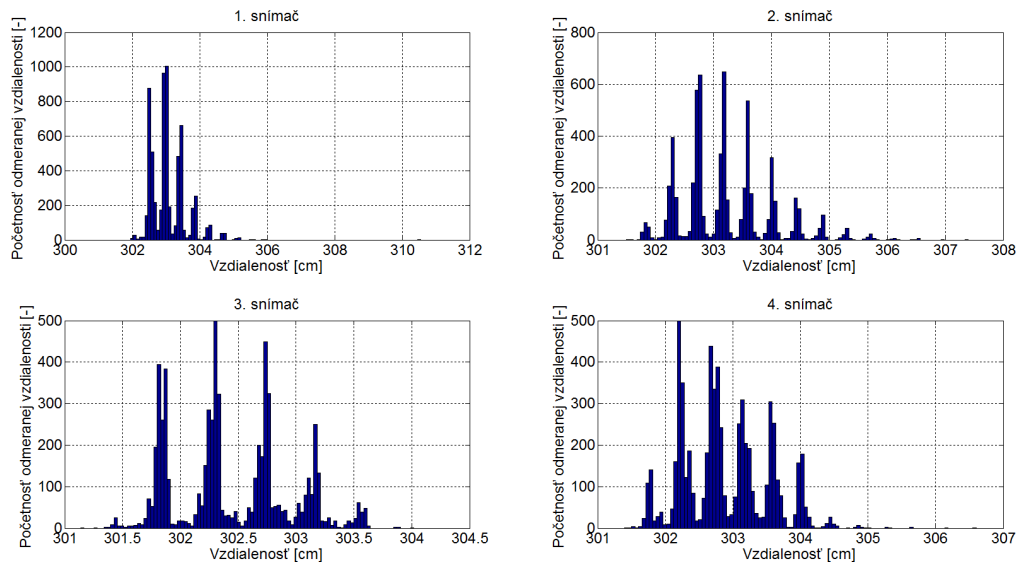
5.2.4. Meranie vzdialenosti 3,02 m pomocou štyroch snímačov - synchronne spúšťanie

Pri predposlednom meraní z prvého súboru bola snímaná vzdialenosť $l = 3,02 \text{ m}$ a namerané dáta sú na obr. 5.9. Už v predchádzajúcom meraní sa objavili nepresnosti, avšak s narastajúcou meranou vzdialenosťou, sa nepresnosti odmerania vzdialenosti zväčšujú a vyskytujú častejšie. Pri všetkých snímačoch sa vyskytli nepresne odmerané vzdialenosti, s početnosťami od 238 až do 940. Nepresnosti týchto senzorov sa objavili v zápornom smere ojedinele, a to len do -2 mm pod spodnými hranicami intervalov tolerancie. V kladnom smere sa nepresné odmerania vyšplhali až do $+6 \text{ cm}$ nad interval tolerancie I . Približne rovnaká ČK sa opätovne prejavila z neznámych príčin, s takisto rastúcim trendom aj pri tomto meraní. Predpoklady vzniku sú znovu rovnaké ako pri predchádzajúcich meraniach. Meranie je možné považovať za relatívne presné, avšak ako bolo spomenuté, výskyt nepresností narástol. Nepresne odmerané vzdialenosti môžu byť spôsobené buď základnou vlastnosťou snímačov SRF05, a to že s rastúcou snímanou vzdialenosťou senzory merajú s nižšou presnosťou a spoľahlivosťou, alebo tieto nepresnosti sú spôsobené vzájomným ovplyvnením - prepočutím - pri synchronnom spúšťaní merania.



Obr. 5.9: Namerané dáta zo 4 snímačov pri meraní vzdialenosti 3,02 m

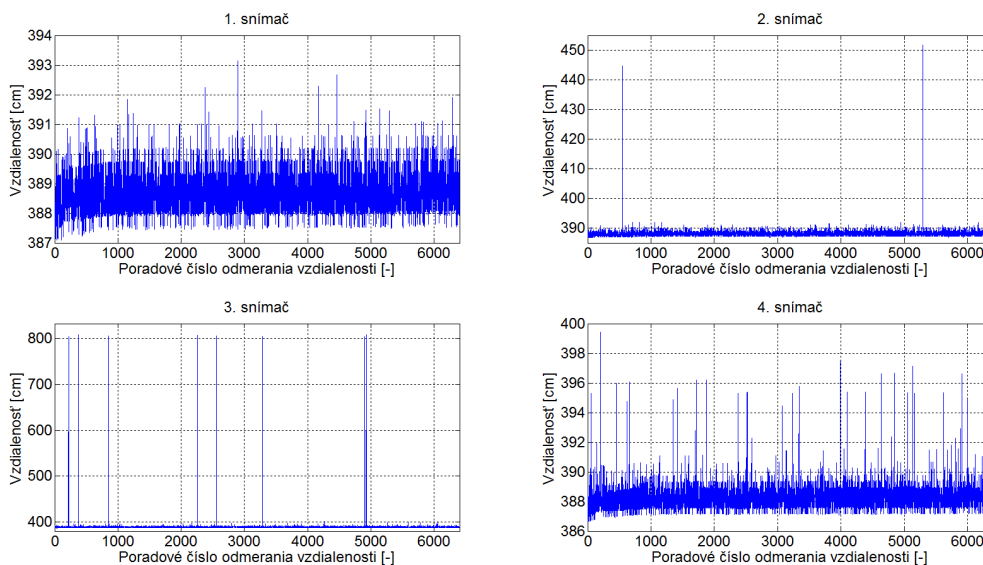
Histogramy nameraných dát pre jednotlivé snímače sú na obr. 5.10, z ktorých je jasne vidieť nepresnosť merania pomocou snímača 2, pretože sa nachádza mnoho nameraných vzdialeností s vysokými početnosťami nad hranicou $303,5 \text{ cm}$. Z rozdelenia dát nameraných pomocou snímača 4 je taktiež vidieť nepresnosti. Tak ako vždy, aj teraz snímače zosníмали rôzne vzdialenosti vytvárajúce niekoľko dĺžkových intervalov s rozdielnymi početnosťami a šírkami. Rovnako ako pri predchádzajúcich meraniach, sledované štatistické veličiny budú uvedené v tabuľke 5.1 pri zhodnotení prvého súboru meraní v podkapitole 5.2.6.



Obr. 5.10: Histogramy nameraných dát pri meraní vzdialenosti 3,02 m

5.2.5. Meranie vzdialenosti 3,87 m pomocou štyroch snímačov - synchronne spúšťanie

Posledným meraním z prvého súboru bolo snímanie vzdialenosti $l = 3,87 \text{ m}$. Z limitujúcich rozmerov miestnosti, v ktorej sa meranie uskutočnilo bola táto vzdialenosť maximálna možná, a navyše podľa datasheetu majú SRF05 merací rozsah iba do 4 m.

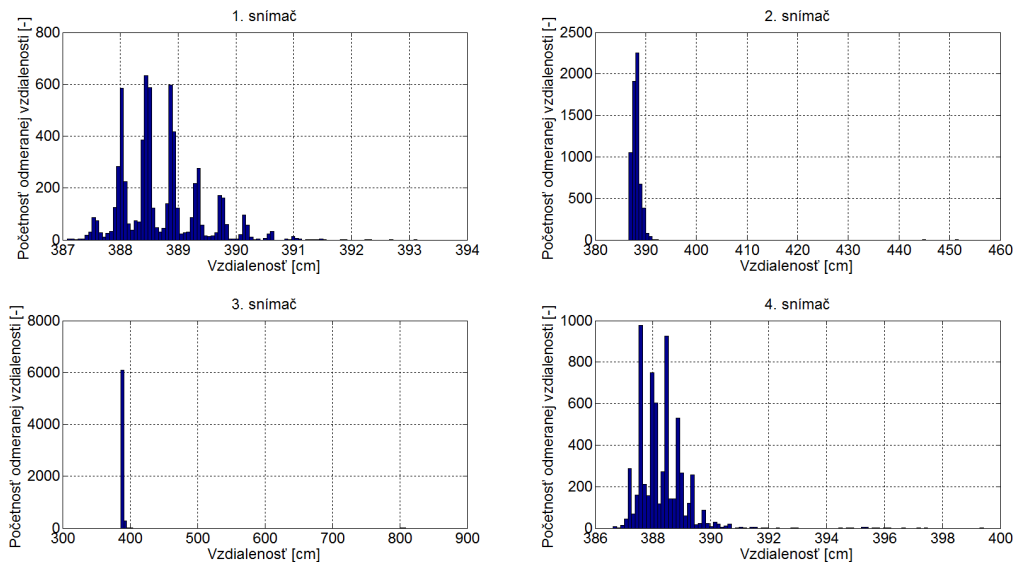


Obr. 5.11: Namerané dáta zo 4 snímačov pri meraní vzdialenosti 3,87 m

Takže vzdialenosť $l = 3,87 \text{ m}$ je dostatočne blízko k hornej hranici meracieho rozsahu. Namerané dáta sú zobrazené na obr. 5.11 a ich rozdelenia pre jednotlivé snímače sú na obr. 5.12. Možno nie je jednoznačne vidieť z nameraných dát, že aj v tomto prípade sa ČK prejavila s rovnakými parametrami ako pri predchádzajúcich meraniach. Toto meranie bolo najmenej presné z doterajších realizovaných meraní. Priemerné odmerané vzdiale-

5.2. PRVÝ SÚBOR MERANÍ- ZISŤOVANIE PRESNOSTI SNÍMAČOV PRE RÔZNE VZDIALENOSTI

nosti \bar{l}_i jednotlivých senzorov sa nejak výrazne nelíšili od skutočnej meranej vzdialenosti l . Ale pri každom snímači sa vyskytli rádovo stovky až tisícky nepresne odmeraných vzdialeností. Snímače 1 a 4 merali v tomto prípade najpresnejšie, avšak vzdialenosť odmerali 929-krát a 914-krát mimo ich intervaly tolerancie I_i , z celkového počtu 6399 zosnímaných vzdialeností (celkový počet je rovnaký pre všetky snímače). Pri snímači 1 boli nepresnosti až -4 mm pod spodnú hranicu, a do $+3,5\text{ cm}$ nad hornú hranicu intervalu tolerancie I_1 . Snímač 4 meral o niečo nepresnejšie, s nepresnosťami do -5 mm pod spodnú hranicu intervalu, a do $+10\text{ cm}$ nad hornú hranicu intervalu tolerancie I_4 . Senzor 2 mal najnižšiu početnosť nepresne odmeraných vzdialeností, a jeho priemerná odmeraná vzdialenosť $l_2 = 388,12\text{ cm}$ je najbližšie ku skutočnej vzdialenosti $l = 387\text{ cm}$. Avšak nepresnosti tohoto senzoru boli až do $+62\text{ cm}$ mimo jeho interval tolerancie. Najhoršie meral snímač 3, ktorého početnosť nepresných odmeraní mimo interval tolerancie je rádovo v tisícoch, resp. presne 3096-krát, s ojedinelými nepresnosťami až do jednotiek metrov. Meranie snímačom 3 považujem za nepresné, keďže nepresnosti ovplyvnili aj tvar histogramu nameraných dát (obr. 5.12) a pravdepodobne to je spôsobené vzájomným ovplyvnením alebo sa občas mohlo stať, že vzdialenosť proste neodmeral (neprijal odraz ultrazvuku). Sledované štatistické veličiny budú takisto uvedené v tabuľke 5.1, pri zhodnotení prvého súboru meraní v nasledujúcej podkapitole 5.2.6.



Obr. 5.12: Histogramy nameraných dát pri meraní vzdialenosti 3,87 m

5.2.6. Zhodnotenie prvého súboru meraní

Prvým súborom meraní som zistil, že snímače merajú presne v prvej polovici meracieho rozsahu. Vo väčšine odmeraní bola výsledná vzdialenosť správna, až na niekoľko prípadov. Zistil som, že s narastajúcou vzdialenosťou nad 2 m klesá spoľahlivosť odmeranej vzdialenosti. Ďalej sa v niektorých meraniach vyskytuje časová konštanta τ , ktorá má zatiaľ neznámu príčinu. Predpoklad vzniku ČK je vplyv zohriatia sensoriky tým že sa používa. Ešte sa zistilo, že snímače sa zrejme vzájomne ovplyvňujú, čo môže spôsobovať chybné odmeranie. Zaviedol sa interval tolerancie I , ktorý bol vyššie opísaný. Toto zavedenie je z dôvodu, že pri osadení snímačov do kontaktného poľa, je určitá vôľa v jednotlivých

5. MERANIE - ZISŤOVANIE VLASTNOSTÍ SNÍMAČOV

<i>Prvý súbor meraní</i>				
	1. snímač	2. snímač	3. snímač	4. snímač
Snímaná vzdialenosť: 4,5 cm				
Priemerná vzdialenosť \bar{l}_i [cm]	4,51	3,85	3,86	4,21
Rozptyl merania σ_i^2 [cm^2]	0,02	0,04	0,03	0,04
Rozdiel skutoč. - odmer. vzdial. [cm]	-0,01	0,65	0,64	0,29
Snímaná vzdialenosť: 1 m				
Priemerná vzdialenosť \bar{l}_i [cm]	99,89	101,58	99,88	100,17
Rozptyl σ_i^2 [cm^2]	0,13	2,34	0,07	0,33
Rozdiel skutoč. - odmer. vzdial. [cm]	0,11	-1,58	0,12	-0,17
Snímaná vzdialenosť: 2,01 m				
Priemerná vzdialenosť \bar{l}_i [cm]	201,04	200,91	201,35	201,41
Rozptyl σ_i^2 [cm^2]	0,11	0,16	0,32	0,28
Rozdiel skutoč. - odmer. vzdial. [cm]	-0,04	0,09	-0,35	-0,41
Snímaná vzdialenosť: 3,02 m				
Priemerná vzdialenosť \bar{l}_i [cm]	303,07	303,22	302,44	302,89
Rozptyl σ_i^2 [cm^2]	0,26	0,62	0,25	0,40
Rozdiel skutoč. - odmer. vzdial. [cm]	-1,07	-1,22	-0,44	-0,89
Snímaná vzdialenosť: 3,87 m				
Priemerná vzdialenosť \bar{l}_i [cm]	388,69	388,12	389,38	388,30
Rozptyl σ_i^2 [cm^2]	0,45	1,69	219,11	0,73
Rozdiel skutoč. - odmer. vzdial. [cm]	-1,69	-1,12	-2,38	-1,30

Tabuľka 5.1: Tabuľka štatistických veličín prvého súboru nameraných dát

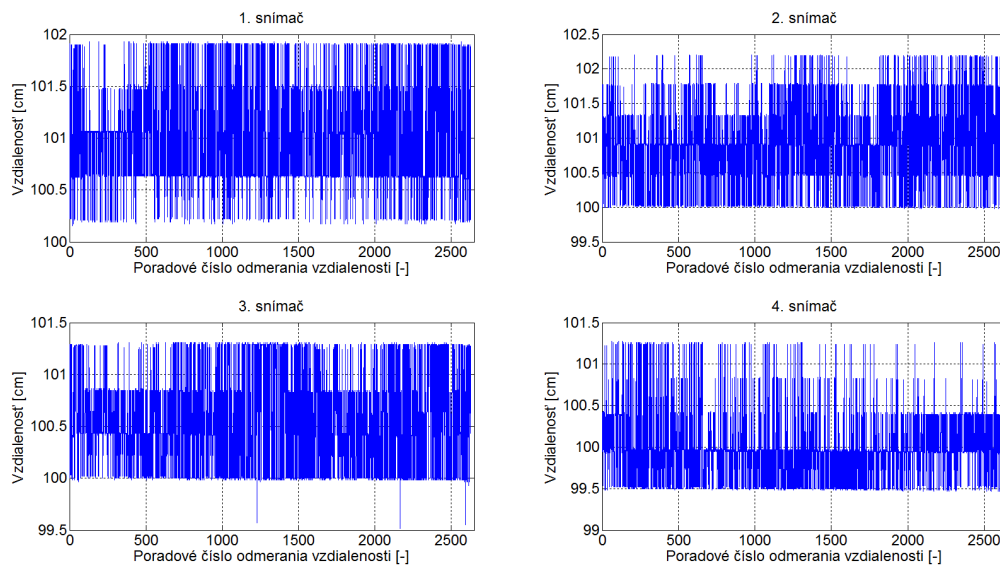
kontaktoch, a senzory sa dajú nakloniť o pár stupňov, čo môže pri väčších vzdialenostiach ovplyvňovať meranie vzdialenosti. Osadiť senzory do kontaktného poľa vždy rovnako, resp. zaistiť ich náklon vždy rovnaký nie je možné. Avšak, pri každom spúšťaní merania bola snaha toto dosiahnuť, teda aby senzory boli osadené kolmo na zem. Nepresnosti odmerania vzdialenosti (vznik odľahlých intervalov dĺžok) mohli byť spôsobené aj prepočítím snímačov. Sledované štatistické veličiny meraní, rozptyl merania σ_i^2 a aritmetický priemer merania vzdialenosti \bar{l}_i , pre jednotlivé snímače je sú uvedené v tabuľke 5.1.

Priemerné odmerané vzdialenosti \bar{l}_i sa výrazne nelíšili od skutočnej vzdialenosti. Väčšinou sa priemerná odmeraná vzdialenosť \bar{l}_i pohybovala v intervale ± 1 cm od skutočnej vzdialenosti l . Jednotlivé rozptyly meraní σ_i^2 vychádzali rádovo od desiatín milimetrov do jednotiek centimetrov. Pri jednom jedinom meraní je rozptyl zásadne odlišný, a to 219 cm^2 pri meraní vzdialenosti 3,87 m snímačom 3. Toto meranie bolo vyššie opísané ako nepresné, keďže boli veľakrát zosnímané dvojnásobne väčšie vzdialenosti ako skutočná vzdialenosť, takže to má zásadný vplyv na rozptyl tohto merania.

5.3. Druhý súbor meraní - zisťovanie miery vzájomného ovplyvňovania snímačov

Priebeh druhého súboru meraní, pri snímaní vzdialenosti pomocou dvoch a viac snímačov, bol realizovaný pomocou sekvenčného spúšťania, teda jeden snímač vyslal ultrazvuk a počkalo sa, kým sa odrazená vlna vráti. Následne je odmeraná vzdialenosť vypočítaná a uložená do textového súboru v PC a až potom meria ďalší snímač rovnakým spôsobom. Meraná vzdialenosť bola $l = 1\text{ m}$ pre všetky merania, ktoré sa vykonávali pomocou 1 alebo 4 snímačov. V prípade merania pomocou 4 snímačov, bola vzdialenosť snímaná tak, že každý snímač mal na odmeranie vzdialenosti 0,25 sekundy, čo odpovedá 1 sekunde meracieho času, a následne sa čakalo ďalšiu 1 sekundu, než sa spúšťacie signály začali znovu postupne vysielat'. V takýchto 2-sekundových cykloch sa merania opakovali. Dokopy boli uskutočnené tri merania, prvé bolo za denného svetla, druhé meranie bolo uskutočnené večer za tmy, a tretie opäť cez deň, ale bol použitý iba jeden snímač.

5.3.1. Meranie vzdialenosti 1 m pomocou 4 snímačov za denného svetla - sekvenčné spúšťanie

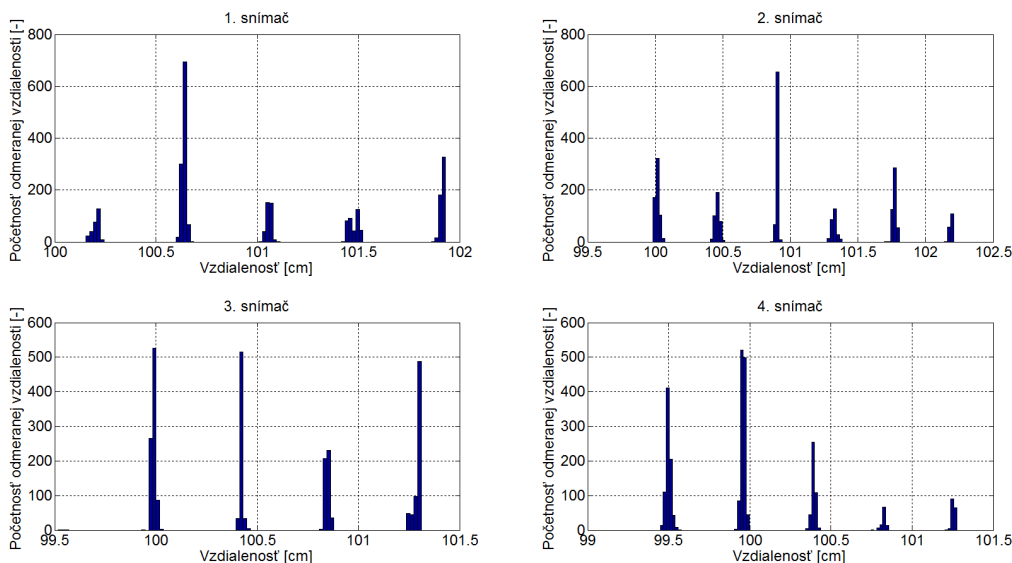


Obr. 5.13: Namerané dáta zo 4 snímačov pri meraní vzdialenosti 1 m za denného svetla

Okrem spomenutého cieľa tohoto súboru meraní, bola snaha získať prvé poznatky o tom, ako svetelné podmienky vplyvajú na meranie vzdialenosti. Pre elimináciu prepočutí (napr. snímač 1 bude zachytávať vyslaný ultrazvuk snímača 4 a tak podobne), sa zvolilo sekvenčné spúšťanie snímačov. Meranie trvalo približne 1,5 hodiny s frekvenciou snímania celého cyklu všetkých 4 snímačov raz za 2 sekundy. Na obr. 5.13 sú namerané dáta, z ktorých je zjavné, že časová konštanta τ sa tentokrát neprejavila. Snímače 1 a 3 merali presne, pretože takmer všetky odmerané vzdialenosti týchto snímačov sa pohybovali v ich intervaloch tolerancie $I_1 = (100, 102)\text{ cm}$ a $I_3 = (99.5, 101.5)\text{ cm}$ z ich priemernej odmeranej vzdialenosti \bar{l}_i . Pri snímačoch 2 a 4 sa vyskytlo niekoľko nepresností rádovo

v stovkách, avšak tieto boli maximálne do $+2$ mm nad ich intervaly tolerancie, čo by sa dalo považovať ešte za presné meranie. Sledované štatistické veličiny boli v tomto prípade rovnaké ako pri prvom súbore meraní, a budú uvedené v tabuľke 5.2 v podkapitole 5.3.4.

Histogramy nameraných dát prvého merania z druhého súboru sú na obr. 5.14. Ako vidieť, tak aj pri sekvenčnom spúšťaní, sa objavili dĺžkové intervaly. Pre každý snímač sa ich vyskytlo 4 až 6, s rôznymi početnosťami, čo nebolo očakávané, keďže som si mysleli že je tento jav spôsobený vzájomným ovplyvnením snímačov. Avšak aspoň sú podstatne užšie, než pri synchronnom spúšťaní. Meranie zopakujeme aj za tmy, a uvidíme či sa znovu objavia dĺžkové intervaly, a potom na základe výsledkov určia ďalšie merania.



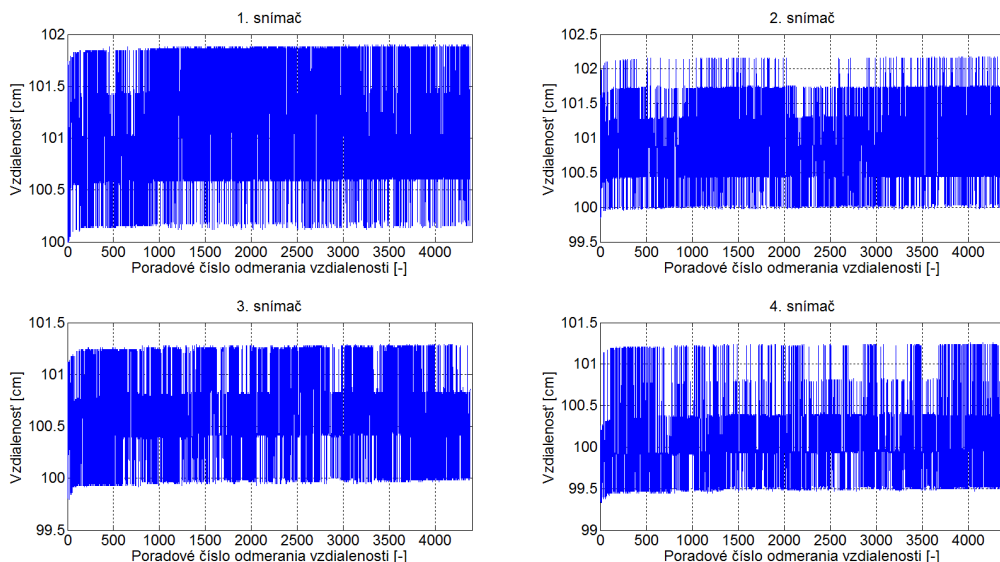
Obr. 5.14: Histogramy nameraných dát pri meraní vzdialenosti 1 m za denného svetla

5.3.2. Meranie vzdialenosti 1 m pomocou 4 snímačov za tmy - sekvenčné spúšťanie

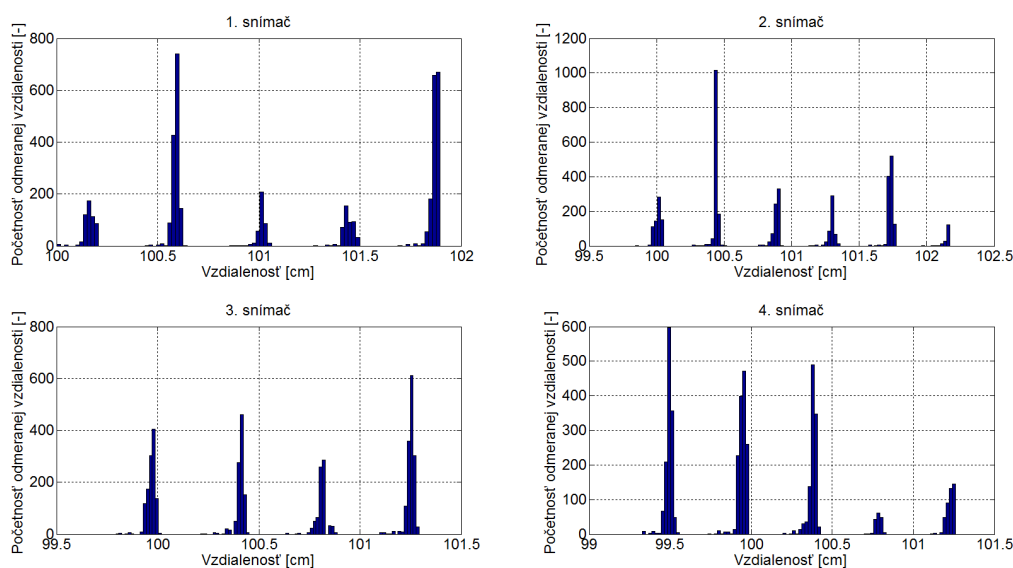
Z nadpisu je zrejmé že meranie prebiehalo večer, bez akéhokoľvek osvetlenia. Okrem zistenia vzájomného ovplyvňovania snímačov, sa týmto meraním chceli zistiť aj prvé informácie ako senzory reagujú na zmenu svetelných podmienok. Spúšťanie sme zvolili takisto sekvenčné, ako bolo uvedené v úvode tejto kapitoly. Doba trvania merania bola približne 2,5 hodiny, s rovnakou frekvenciou snímání, ako pri predchádzajúcom meraní. Namerané dáta sú na obr. 5.15 a je vidieť, že časová konštanta τ sa znovu objavila pri všetkých snímačoch z neznámych dôvodov. Meranie snímačov 1 a 3 je možné považovať za presné, keďže namerané vzdialenosti sa pohybovali takmer vždy v intervaloch tolerancie I_i . Snímače 2 a 4 takisto merali relatívne presne, aj keď sa vyskytli nepresnosti do $+3$ mm nad ich intervaly tolerancie I_i s početnosťami rádovo v stovkách. Z priemerných vypočítaných veličín nameraných dát a ich následným porovnaním s výsledkami predošlého merania, a takisto porovnaním nameraných dát, je možné pozorovať vplyv slabého osvetlenia. Predpokladom je, že slabšie osvetlenie až tma spôsobuje odmeranie kratšej vzdialenosti rádovo v jednotkách milimetrov, oproti osvetleniu denným svetlom.

Na obr. 5.16 sú zobrazené histogramy nameraných dát. Taktiež aj pri tomto meraní bolo odmeraných niekoľko dĺžkových intervalov s užšími šírkami oproti intervalom

5.3. DRUHÝ SÚBOR MERANÍ - ZISŤOVANIE MIERY VZÁJOMNÉHOVPLYVNŔOVANIA SNÍMAČOV



Obr. 5.15: Namerané dáta zo 4 snímačov pri meraní vzdialenosti 1 m za tmy

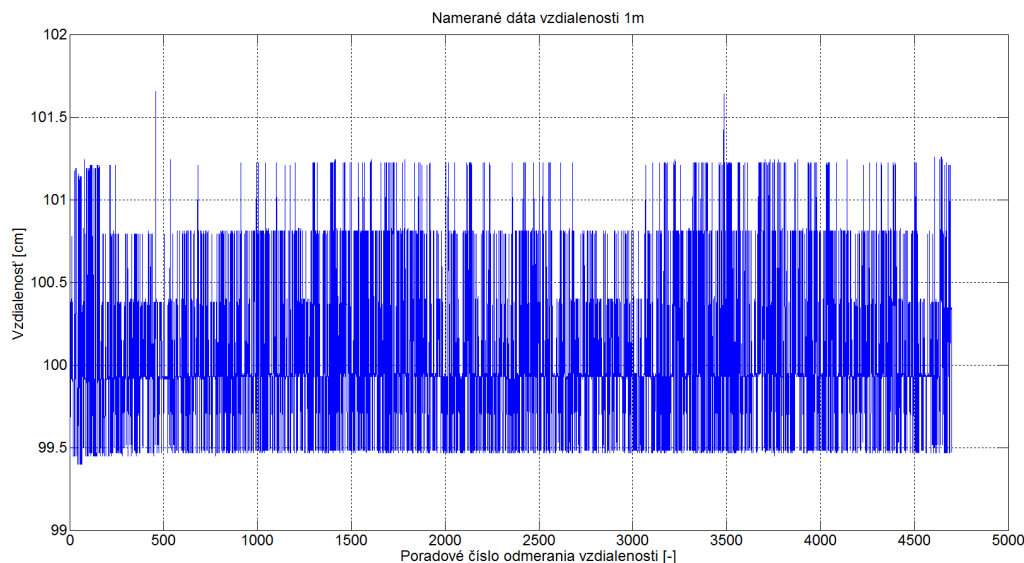


Obr. 5.16: Histogramy nameraných dát pri meraní vzdialenosti 1 m za tmy

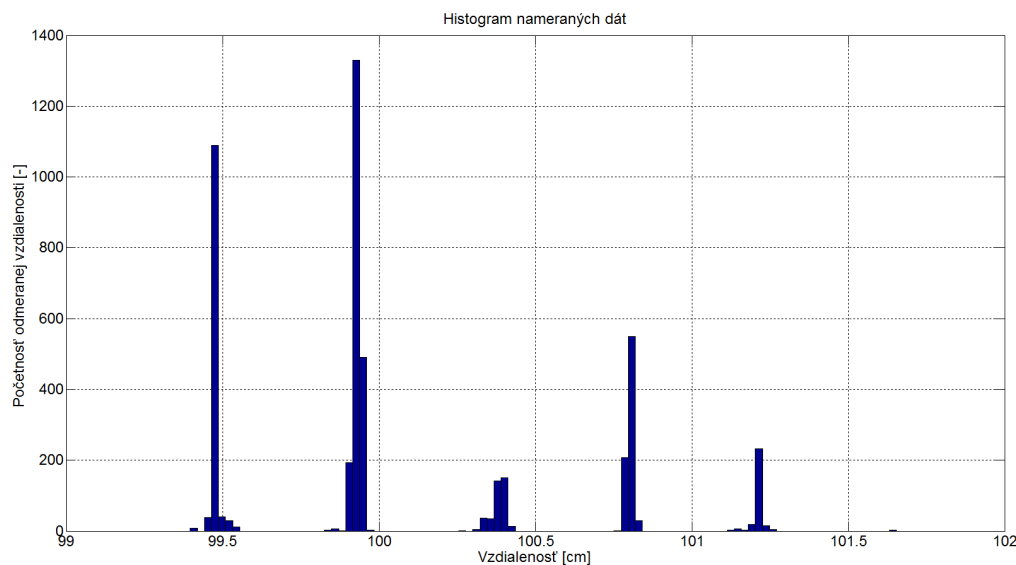
pri synchronnom spúšťaní. Je možné teda prehlásiť, že dĺžkové intervaly nevznikajú vplyvom prepočítania snímačov - prijímaním vyslaných ultrazvukov od iných snímačov. Keďže dĺžkové intervaly sa vždy nachádzajú v okolí blízkom skutočnej meranej vzdialenosti l , tak vznik týchto intervalov sa stanovil ako základná vlastnosť senzorov SRF05. Logicky sa to dá opodstatniť tak, že nie je možné očakávať, aby snímač vždy odmeral úplne takú istú vzdialenosť na milimeter presne, pri dlhodobom statickom meraní, keďže SRF05 fungujú na *Dopplerovom princípe*. Pre istotu a overenie sa vykonalo ešte jedno meranie pomocou jedného snímača, aby sa overilo že intervaly dĺžok vznikajú aj pri použití jedného senzoru, a nie sú spôsobené vzájomným ovplyvnením. Štatistické veličiny budú opäť uvedené v tabuľke 5.2 v podkapitole 5.3.4.

5.3.3. Meranie vzdialenosti 1 m pomocou 1 snímača

Keďže sa použil iba jeden senzor pre snímanie vzdialenosti $l = 1\text{ m}$, tak nemá zmysel rozprávať o spôsobe spúšťania. Snímač vyšle ultrazvuk, ktorého odraz následne prijme, prepočíta odmeranú vzdialenosť a cyklicky takto meria dookola s frekvenciou snímania $f_s = 1,3\text{ Hz}$, čo odpovedá snímaniu raz za 0,75 sekundy. Meranie bežalo po dobu 40 minút. Namerané dáta sú na obr. 5.17 a je možné prehlásiť, že meranie bolo celkom presné, keďže sa objavilo z celkového počtu odmeraní 4700 iba 285 nepresností do $+6\text{ mm}$ nad interval tolerancie I_i .



Obr. 5.17: Namerané dáta z 1 snímača pri meraní vzdialenosti 1 m



Obr. 5.18: Histogram nameraných dát pri meraní vzdialenosti 1 m

Rozdelenie nameraných dát je zobrazené na obr. 5.18. Nakoľko aj pri meraní iba jedného snímača vzniklo niekoľko intervalov dĺžok, tak je teda jasné, že vznik týchto inter-

5.4. TRETÍ SÚBOR MERANÍ - ZISŤOVANIE VPLYVU SVETLA A TEPLoty

valov nie je spôsobený vzájomným ovplyvnením - prepočutím - snímačov. Prečo vznikajú tieto dĺžkové intervaly sa nepodarilo zistiť, ale ich logické opodstatnenie je opísané v predchádzajúcej podkapitole, a vznik týchto dĺžkových intervalov I_i bol stanovený ako základná vlastnosť snímačov SRF05.

5.3.4. Zhodnotenie druhého súboru meraní

Druhým súborom meraní bolo zistené, že vznik intervalov dĺžok pri použití viacerých snímačov SRF05 nevzniká vzájomným ovplyvnením - prepočutím, ale bol stanovený ako základná vlastnosť snímačov. Ďalej sa získali informácie o vplyve zmeny svetelných podmienok, aj keď vplyv je veľmi malý. Je to zatiaľ iba predpoklad, že za tmy snímače merajú o pár milimetrov väčšiu vzdialenosť, ako keď merajú počas denného svetla tú istú vzdialenosť. Presnejšie zisťovanie vplyvu zmeny svetelných podmienok, bude predmetom ďalších meraní. Štatistické veličiny druhého súboru meraní sú uvedené v tabuľke 5.2, a je zrejmé že všetky merania boli pomerne presné. Pri niektorých sa vyskytlo viac a pri iných zase menej nepresností. Narastajúci rozdiel medzi skutočnou a priemernou odmeranou vzdialenosťou bol zapríčinený šikmým umiestnením kontaktného poľa so snímačmi voči stene, čo som si pri spúšťaní merania nevšimol.

<i>Druhý súbor meraní</i>				
	1. snímač	2. snímač	3. snímač	4. snímač
Meranie za denného svetla				
Priemerná vzdialenosť \bar{l}_i [cm]	101,03	100,91	100,58	100,00
Rozptyl σ_i^2 [cm ²]	0,32	0,47	0,26	0,22
Rozdiel skutoč. - odmer. vzdial. [cm]	-1,03	-0,91	-0,58	-0,00
Meranie za tmy				
Priemerná vzdialenosť \bar{l}_i [cm]	101,13	100,92	100,64	100,07
Rozptyl σ_i^2 [cm ²]	0,41	0,43	0,26	0,28
Rozdiel skutoč. - odmer. vzdial. [cm]	-1,13	-0,92	-0,64	-0,07
Meranie s použitím iba 1 snímača - denné svetlo				
Priemerná vzdialenosť \bar{l}_i [cm]	100,08	-	-	-
Rozptyl σ_i^2 [cm ²]	0,28	-	-	-
Rozdiel skutoč. - odmer. vzdial. [cm]	-0,08	-	-	-

Tabuľka 5.2: Tabuľka štatistických veličín druhého súboru nameraných dát

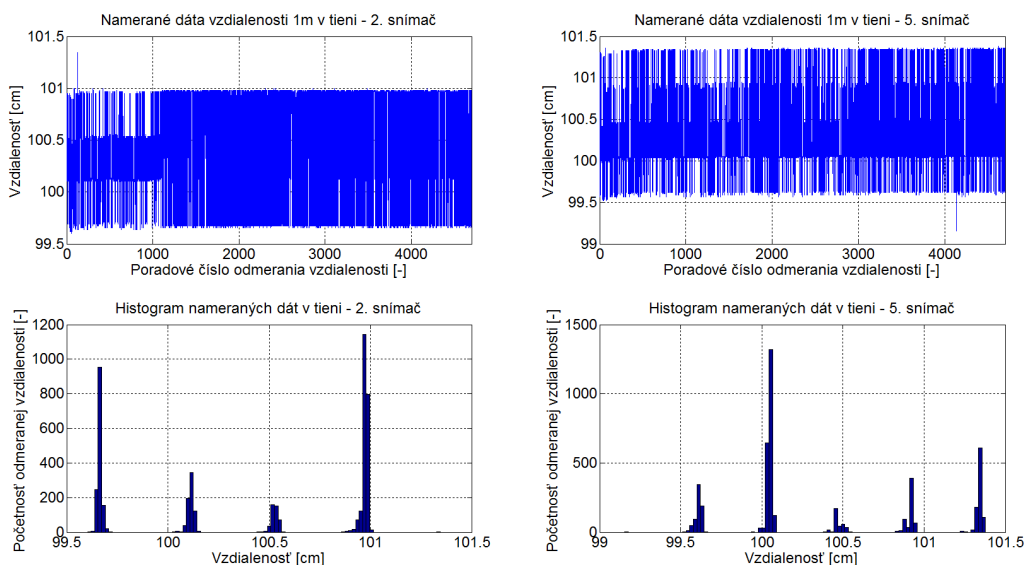
5.4. Tretí súbor meraní - zisťovanie vplyvu svetla a teploty

Už od začiatku boli očakávania, že svetlo a teplota budú mať vplyv na meranie, čo je zrejmé aj z predchádzajúceho súboru meraní. Preto bol vykonaný tento tretí súbor meraní, aby sa lepšie preskúmali spomenuté vplyvy svetelných podmienok a ďalej, aby sa získali prvé poznatky o vplyve teploty. Spôsob spúšťania použitých snímačov nie je potrebné vysvetľovať, pretože pri všetkých meraniach bol využívaný iba jeden snímač,

a jeho spúšťanie už bolo opísané vyššie. Meraní sa vykonalo niekoľko, ale opísané sú len tie najpodstatnejšie, z ktorých sa získali relevantné výsledky.

5.4.1. Prvé zistenie vplyvu slnka (vplyv svetla aj tepla)

Prvé overenie očakávaní, že zmena svetelných a tepelných podmienok vplyva na meranie sa potvrdilo pri meraní, ktorým sa chcelo zistiť, ako veľmi sa líšia namerané dáta získané za rovnakých podmienok pri vystriedaní viacerých kusov snímačov rovnakého typu. Použilo sa 6 rôznych kusov snímačov, ktoré boli k dispozícii od firmy *Bender Robotics*. Zistilo sa, že získané dáta z nich sa nijak výrazne nelíšia meraním pri rovnakých podmienkach. Rozptyly nameraných dát pre všetky snímače sa pohybovali cca do $\sigma_i^2 = \pm 0,4 \text{ cm}^2$ pri snímaní vzdialenosti $l = 1 \text{ m}$. Odmeraná vzdialenosť jednotlivých spustení snímačov sa pohybovala v intervale do $\pm 1 \text{ cm}$ od skutočnej vzdialenosti vo všetkých prípadoch. Dalo by sa povedať, že opakované statické meranie za rovnakých podmienok je *stacionárny ergodický dej*, teda nikdy nedostaneme dvakrát také isté namerané dáta, ale vieme predpovedať ako budú približne vyzeráť. Avšak, počas merania jedným zo šiestich snímačov, zasvietilo slnko na snímanú stenu a na miesto kde bol umiestnený snímač spolu s doskou pre spracovanie signálu. Teda toto meranie nie je možné považovať že bolo uskutočnené za rovnakých podmienok ako ostatné, ale je z neho možné získať prvé informácie o tom, ako svetlo a teplo vplyva na meranie. Pre porovnanie meraní neovplyvnených slnkom s meraním, ktoré bolo ovplyvnené slnkom, budú uvedené ich výsledky.

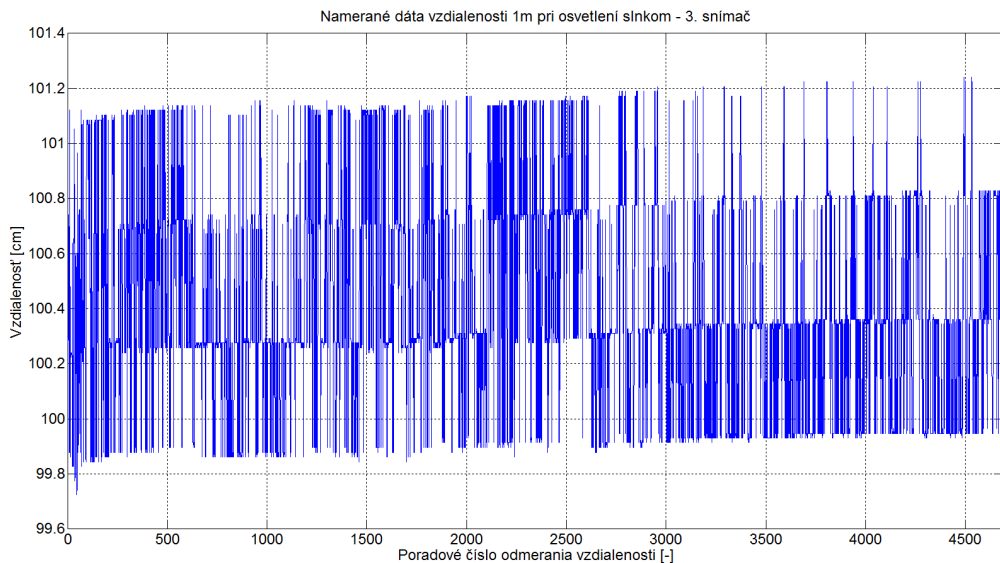


Obr. 5.19: Namerané dáta a ich rozdelenie pri meraní vzdialenosti 1 m v tieni

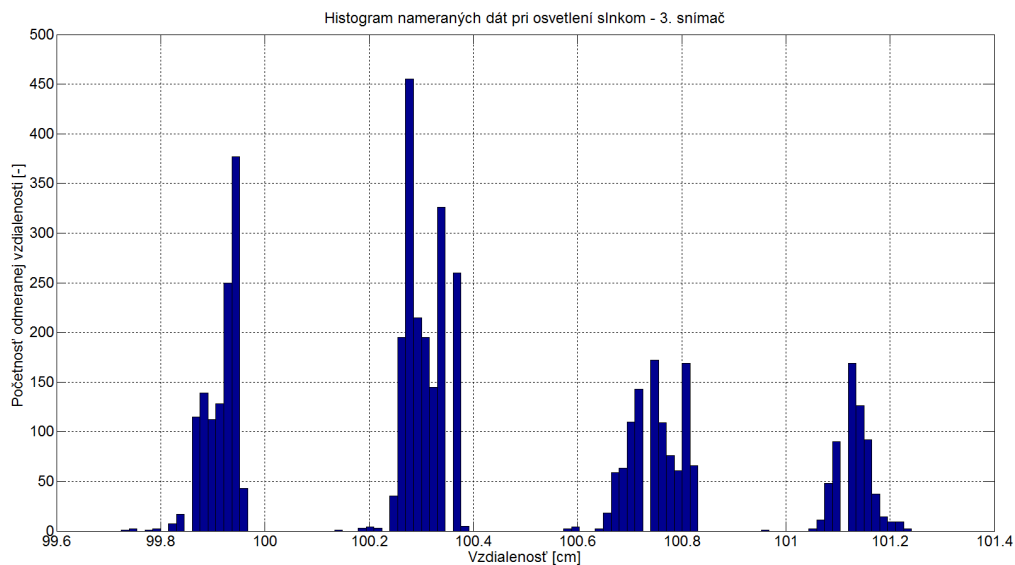
Každé meranie trvalo približne 1 hodinu, s frekvenciou snímania vzdialenosti $f_s = 1,3 \text{ Hz}$, čo odpovedá odmeraniu vzdialenosti raz za 0,75 sekundy. Na obr. 5.19 sú namerané dáta spolu s ich rozdeleniami z dvoch meraní. Pre tieto dve merania sa použili rôzne kusy senzorov, ale merania prebiehali pri rovnakých podmienkach, kedy bola snímaná stena aj použitá sensorika v tieni, a pri izbovej teplote za denného svetla. Z nameraných dát je vidieť, že sa dajú považovať za presné, keďže iba pri snímači 2 sa vyskytla jedna nepresnosť mimo interval tolerance I_2 , a to iba o -3 mm z jeho priemernej odmeranej

5.4. TRETÍ SÚBOR MERANÍ - ZISŤOVANIE VPLYVU SVETLA A TEPLoty

vzdialenosti \bar{l}_2 . Opäť sa vyskytlo niekoľko intervalov dĺžok v histogramoch pri každom meraní.



Obr. 5.20: Namerané dáta merania vzdialenosti 1m počas osvetlenia slnkom



Obr. 5.21: Histogram nameraných dát pri meraní vzdialenosti 1 m počas osvetlenia slnkom

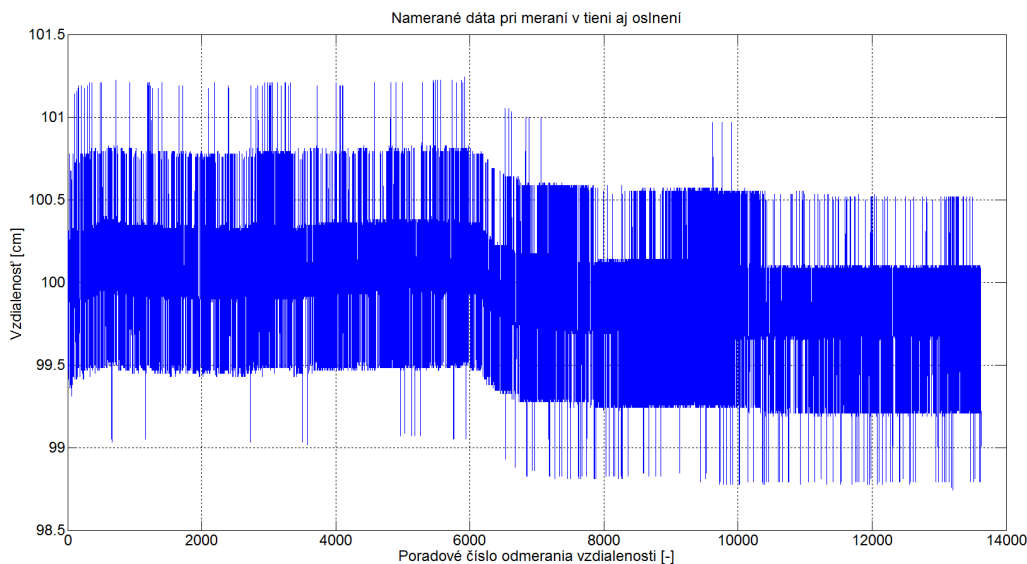
Dáta uvedených dvoch snímačov sú porovnáme s nasledujúcim meraním, kedy slnko zmenilo podmienky merania. Na obr. 5.20 sú namerané dáta tohoto merania, a podmienky boli ovplyvnené tak, že jednak sa zmenilo nasvietenie snímanej plochy, ale sa aj vplyvom žiarenia slnka mohla ohriať použitá sensorika. Ako je z nameraných dát vidieť, tak svetlo alebo teplo ovplyvňuje meranie takým spôsobom, že snímaná vzdialenosť nadobudne rastúci trend o máj milimetrov. Z predchádzajúcich výsledkov je predpoklad, že nasvietenie snímanej plochy ovplyvňuje odmeranie vzdialenosti smerom nadol. Takže pri sviatení slnka bude pravdepodobne hrať väčšiu rolu ohriatie ako nasvietenie. Takisto aj histogram nameraných dát (obr. 5.21) sa zmenil. Dĺžkové intervaly sa vyskytli 4, avšak sú

o niečo málo širšie, ako pri predchádzajúcich meraniach pomocou jedného snímača. Rozdelenie týchto jednotlivých širších dĺžkových intervalov je celkom podobné Gaussovmu rozdeleniu. Teda som získal pre každý interval väčší počet veľmi blízkych odmeraných vzdialeností s menšími početnosťami, z čoho vyplýva že namerané dáta sú rozmanitejšie.

5.4.2. Overenie merania v tieni aj na slnku

Pre overenie výsledkov z predchádzajúceho merania sa realizovalo ešte jedno meranie, ktorého doba snímania bola približne 2 hodiny a prebiehalo pri veľmi podobných podmienkach ako predchádzajúce. Presnejšie, snímane vzdialenosti prebiehalo tak, že približne prvú hodinu svietilo slnko na stenu a senzoriku, a druhú hodinu merania bol všade tieň. Meralo sa s frekvenciou snímania vzdialenosti $f_s = 2 \text{ Hz}$, teda dvakrát za sekundu.

Na obr. 5.22 sú namerané dáta tohoto merania, a je z nich zrejmé to, že sa potvrdili vplyv z predchádzajúceho merania. V čase, keď svietilo slnko na stenu a senzoriku, tak v priemere je odmeraná vzdialenosť približne o $0,3 \text{ cm}$ väčšia, ako keď sa meralo v tieni. Ďalej je možné z nameraných vidieť, že ako slnko prešlo a vznikol tieň, tak postupne klesala aj odmeraná vzdialenosť. Toto meranie sa dá rozdeliť na tri časti, a to na časť kedy boli podmienky merania ovplyvnené žiarením slnka (poradové čísla odmerania vzdialenosti približne 0 - 5900), druhá časť kedy podmienky merania neboli ovplyvnené týmto žiarením - teda nastal tieň, (poradové čísla odmerania vzdialenosti približne 6600 - 13800) a tretia časť prechodová medzi spomenutými dvoma časťami (poradové čísla odmerania vzdialenosti približne 5899 - 6599). Tretiu časť merania nemá význam spracovávať, keďže odmeraná vzdialenosť pomerne prudko klesá vzhľadom na krátky časový interval merania.



Obr. 5.22: Namerané dáta merania vzdialenosti 1 m kedy sa snímalo v tieni ale aj počas osvetlenia slnkom

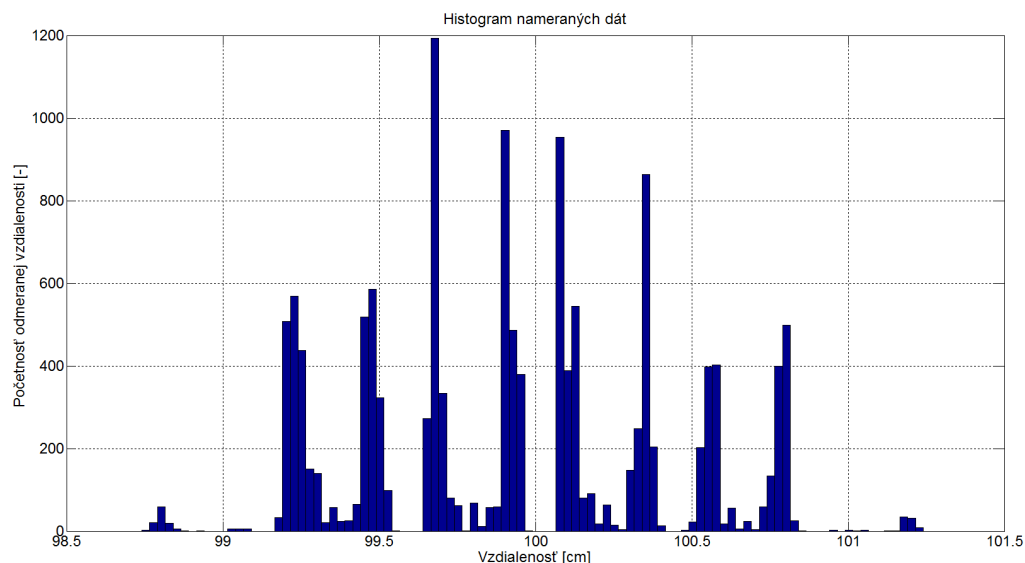
Priemerná odmeraná vzdialenosť \bar{l}_i a rozptyl σ_i^2 prvej a druhej časti tohoto merania sú uvedené v tabuľke 5.3. Aj tieto štatistické dáta potvrdzujú vplyv svetla a tepla na meranie. Avšak, tieto vplyvy budú ešte cieľom meraní pre zistenie, ako konkrétne ovplyvňuje svetlo a teplo zvlášť. Histogram nameraných dát tohoto merania je na obr. 5.23. Je zatiaľ najčlenitejší, resp. obsahuje najviac dĺžkových intervalov, a to 4 najdominantnejšie

5.4. TRETÍ SÚBOR MERANÍ - ZISŤOVANIE VPLYVU SVETLA A TEPLoty

<i>Meranie vzdialenosti 1 m pri zmene svetelných a teplotných podmienok slnkom</i>		
	1. časť merania - svietilo slnko	2. časť - nastal tieň
Priemerná vzdialenosť \bar{l}_i [cm]	100,08	99,81
Rozptyl σ_i^2 [cm ²]	0,23	0,22
Rozdiel skutoč. - odmer. vzdial. [cm]	-0,08	0,19

Tabuľka 5.3: Tabuľka štatistických veličín merania pri zmene svetelných a teplotných podmienok slnkom

a ďalšie 4 s nižšími početnosťami. To je pochopiteľné, keďže vplyv slnka je zrejмый, tak sa očakáva, že aj histogram nameraných dát bude rozmanitejší.

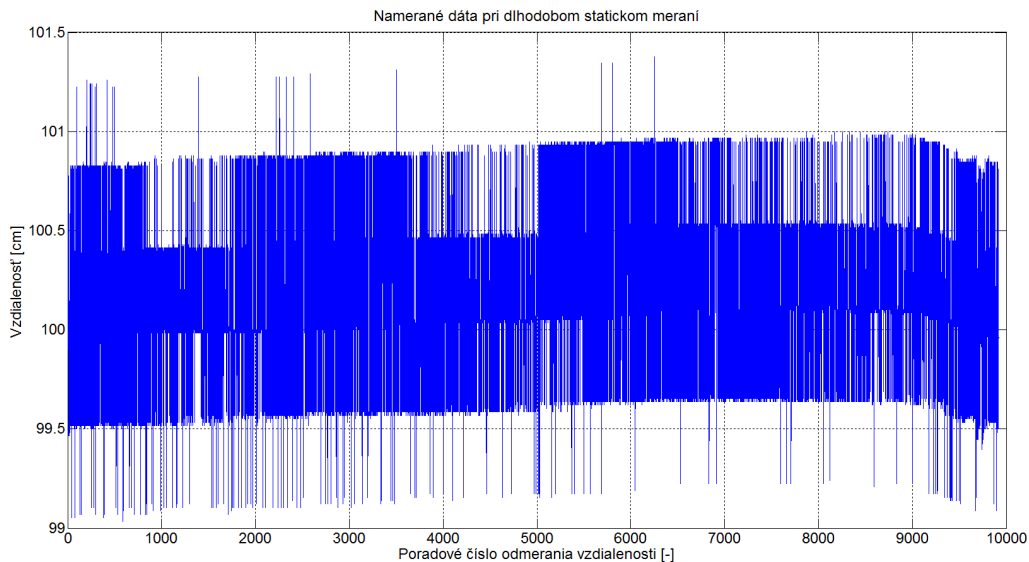


Obr. 5.23: Histogram nameraných dát pri meraní vzdialenosti 1 m počas merania v tieni alebo počas osvetlenia slnkom

5.4.3. Dlhodobé meranie

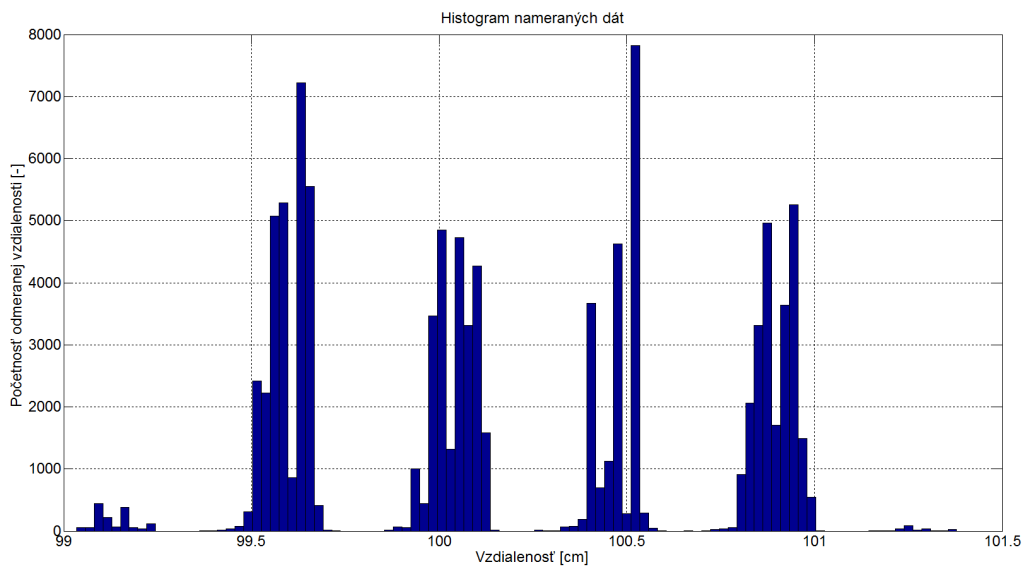
Pre získanie ďalších informácií o ovplyvňovaní merania svetlom/tmou sa vykonalo dlhodobé meranie, ktoré prebiehalo od podvečera až do dopoludnia a trvalo približne 14 hodín. Vzdialenosť sa snímala dvakrát za sekundu ($f_s = 2 \text{ Hz}$). Namerané dáta sú zobrazené na obr. 5.24, avšak pre lepšiu prehľadnosť dát, je zobrazená iba každá 10-tá odmeraná vzdialenosť (teda každých 5 sekúnd). Väčšinu merania prevládala tma, resp. šero. Od začiatku merania po asi 12. hodinu merania (v grafe po cca 8500-té poradové číslo odmerania) majú hodnoty odmeranej vzdialenosti jemne rastúci trend. Ku koncu merania, kedy vyšlo slnko (od cca 8500-tého poradového čísla odmerania vzdialenosti), a začalo denné svetlo, tak odmeraná vzdialenosť začala jemne klesať. Keďže počas merania vôbec nesvietilo slnko, ani na snímanú stenu, ani na použitú senzorku, tak je možné uvažovať iba vplyv osvetlenia. Teda týmto meraním sa zistili prvé informácie o samostatnom vplyve svetla bez súčasného vplyvu oteplenia. Ak sa meranie realizuje v tme, tak snímaná vzdialenosť je o pár milimetrov väčšia ako pri dennom osvetlení. Avšak tieto výsledky sa budú ešte ďalej overovať pri zisťovaní vplyvu tepla.

5. MERANIE - ZISŤOVANIE VLASTNOSTÍ SNÍMAČOV



Obr. 5.24: Namerané dáta počas dlhodobého merania

Histogram nameraných dát je na obr. 5.25, a je vidieť, že obsahuje 4 pomerne široké intervaly dĺžok, posunuté medzi sebou približne o 0,5 cm. Početnosti jednotlivých dĺžok z intervalov sú rádovo od stoviek po tisícky. Rozmanitosť histogramu spôsobili zmeny svetelných podmienok, ale pravdepodobne aj to, že celkovo sa odmeraná vzdialenosť zosnímala takmer 100 000-krát, z čoho vyplýva že budú dáta rozmanité.



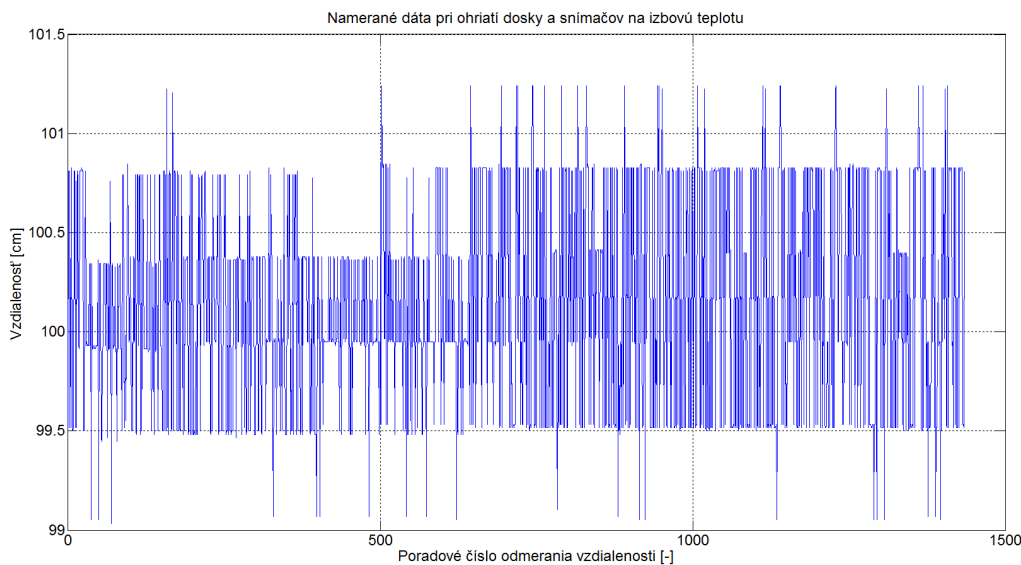
Obr. 5.25: Histogram nameraných dát počas dlhodobého merania

5.5. Štvrtý súbor meraní - upresnenie vplyvu svetla a teploty

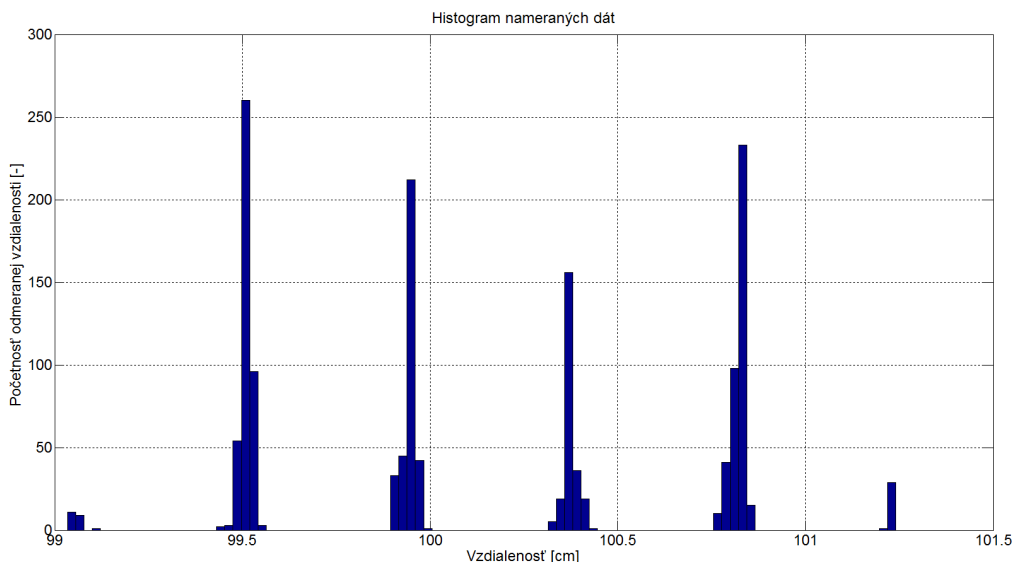
Štvrtý súbor meraní je zameraný na objasnenie ovplyvnenia merania opäť teplom a svetlom, avšak na konkrétne zistenie, ako veľmi ovplyvňuje meranie každý druh zvlášť. V predchádzajúcich podkapitolách už boli uvedené vplyvy svetla/tmy a tepla, avšak v tejto podkapitole sa pokusím potvrdiť tieto zistené vplyv. Všetky merania boli realizované pomocou iba jedného snímača, teda je opäť zbytočné hovoriť o spôsobe spúšťania merania. Experimentov sa celkom vykonalo šesť, a každý jeden bude popísaný.

5.5.1. Meranie pri ohriatí používanej senzoričky

Cieľom merania bolo zistiť, ako veľmi ovplyvňuje výsledky zmena teploty používanej senzoričky. Snímanie vzdialenosti $l = 1\text{ m}$ bolo realizované pri izbovej teplote, avšak doska a snímač boli vychladené na približne 10°C , čo odpovedalo teplote vonku. Tesne pred spustením merania sa senzorička premiestnila z vonku naspäť do izby a následne sa spustilo meranie. Toto meranie trvalo približne 15 minút s frekvenciou snímania vzdialenosti $f_s = 1,67\text{ Hz}$, čo odpovedá snímaniu jeden raz za 0,6 sekundy. Dáta získané počas tohoto merania sú na obr. 5.26, a meranie by sa dalo považovať za presné, keďže takmer všetky odmerané vzdialenosti sú v intervale tolerancie I od priemernej odmeranej vzdialenosti \bar{l}_i . Nepresných odmeraní sa vyskytlo 51 z celkového počtu 1435, a to len do $\pm 1\text{ mm}$ mimo interval tolerancie. Počas celého merania sa stredná hodnota nemenila, teda malé oteplenie použitej senzoričky nemá žiaden vplyv na meranie. Histogram nameraných dát je na obr. 5.27, ktorý takisto obsahuje niekoľko dĺžkových intervalov. Priemerná odmeraná vzdialenosť z nameraných dát bola $\bar{l}_1 = 100,15\text{ cm}$ a rozptyl dát $\sigma_1^2 = 0,30\text{ cm}^2$, tieto veličiny budú porovnávané s výsledkami nasledujúceho merania v podkapitole 5.5.2.



Obr. 5.26: Namerané dáta pri oteplení dosky aj snímačov z 10°C na izbovú teplotu



Obr. 5.27: Histogram nameraných dát počas oteplenia sensoriky z 10°C na izbovú teplotu

5.5.2. Meranie so zohriatou sensorikou jej používaním

Pri tomto snímaní vzdialenosti $l = 1 \text{ m}$ bola sensorika používaná už pred spustením merania a zápisu dát, teda by sa dalo povedať, že teplota sensoriky už pred meraním a takisto aj počas merania, mala približne konštantnú teplotu. Cieľom merania je získať informácie a porovnať ich s prechádzajúcim meraním, pre zistenie vplyvu medzi meraním so zohriatím sensoriky už pred jeho spustením, a či zohriatie zo studenejšej teploty, na teplotu ktorú sensorika dosiahne tým že je zapnutá, a používaná. Toto meranie bolo realizované pomocou jedného snímača. Snímanie trvalo takisto približne 15 minút s frekvenciou snímania $f_s = 1,67 \text{ Hz}$, teda jedenkrát za 0,6 sekundy. Namerané dáta sú na obr. 5.28 a je možné toto meranie považovať takisto za presné z pohľadu presnosti nameraných dát, keďže sa pohybujú v intervale tolerancie I , okrem dvoch hodnôt s nepresnosťou $+2 \text{ mm}$. Dáta sa výrazne neodlišujú od predchádzajúceho merania. Priemerná odmeraná vzdialenosť tohoto merania je $\bar{l}_1 = 100,06 \text{ cm}$ a rozptyl dát $\sigma_1^2 = 0,17 \text{ cm}^2$.

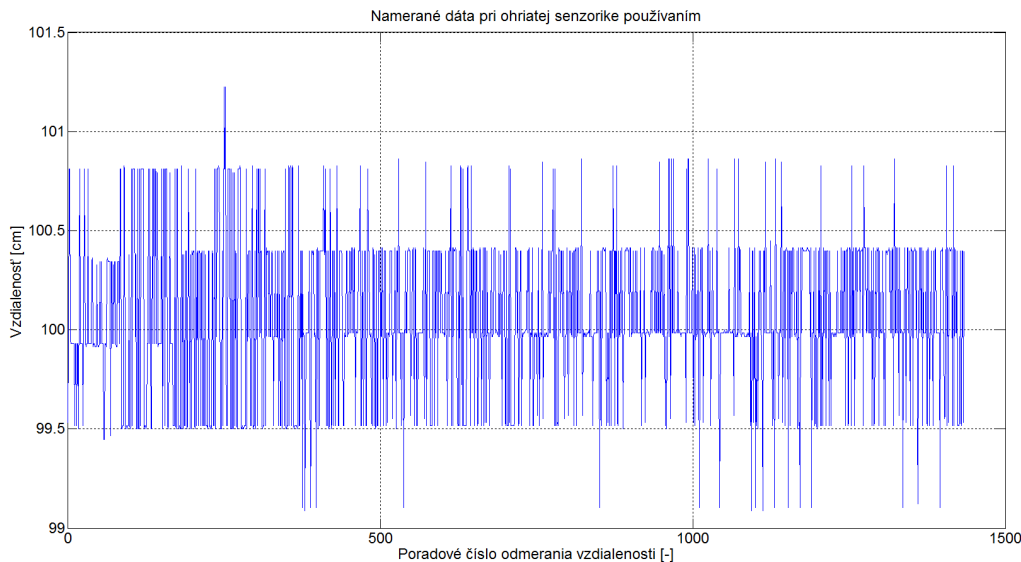
Na obr. 5.29 je histogram nameraných dát merania, ktorý nemá nijak výrazne odlišné vlastnosti od doterajších meraní pri rovnakých podmienkach. Pre prehľadnosť sledovaných štatistických veličín porovnávaných meraní, sú uvedené v tabuľke 5.4.

Porovnanie štatistických veličín		
	1. meranie - ohriatie sensoriky	2. meranie - sensorika s konštantnou teplotou
Priemerná vzdialenosť \bar{l}_i [cm]	100,15	100,06
Rozptyl dát σ_i^2 [cm ²]	0,30	0,17

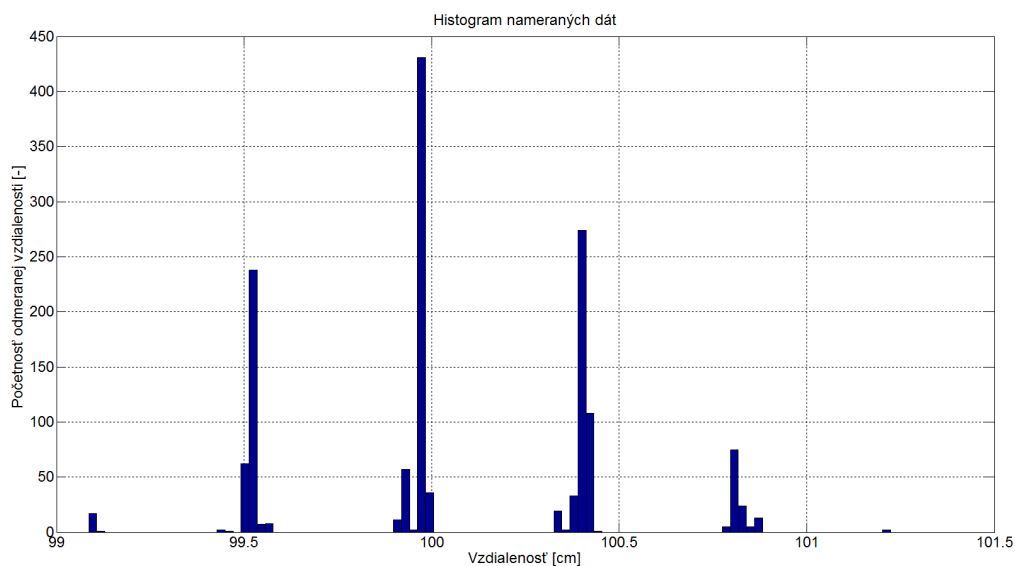
Tabuľka 5.4: Tabuľka porovnávaných štatistických veličín meraní pri zmene teplotných podmienok sensoriky

Keďže sa namerané dáta výrazne neodlišovali, je zrejme že oteplenie o cca 15°C nemá zásadný vplyv na meranie, skôr žiaden. Priemerná vzdialenosť sa líši iba o 1 mm, a rozptyl je o 0,13 cm² väčší pri meraní s ohriatím sensoriky počas merania. Z meraní to nie je

5.5. ŠTVRTÝ SÚBOR MERANÍ - UPRESNENIE VPLYVU SVETLA A TEPLoty



Obr. 5.28: Namerané dáta pri ohriatej doske aj snímači ich používaním



Obr. 5.29: Histogram nameraných dát pri meraní s ohriatou doskou aj snímačom ich používaním

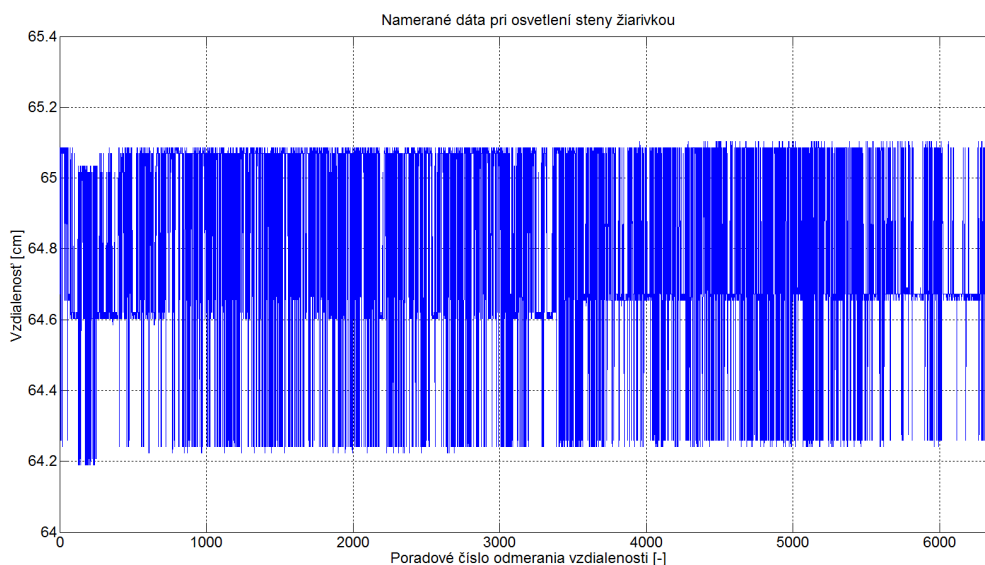
úplne jednoznačné, ale dalo by sa povedať, že ak sa senzorička ohrieva, tak namerané dáta sú o trochu rozmanitejšie, ale zásadný vplyv to nemá pri praktickom použití.

5.5.3. Meranie pri osvetlení snímaného povrchu studeným svetlom - žiarivkou

Cieľom merania bolo potvrdiť vplyv osvetlenia snímaného povrchu. Meranie trvalo približne 1 hodinu, s frekvenciou snímania $f_s = 1,76 \text{ Hz}$ vzdialenosti $l = 65 \text{ cm}$, čomu odpovedá snímanie raz za 0,55 sekundy pomocou jedného snímača. Meranie prebiehalo za denného svetla a prvú polovicu merania svietila na stenu žiarivka (poradové čísla od-

5. MERANIE - ZISŤOVANIE VLASTNOSTÍ SNÍMAČOV

merania vzdialenosti 1 - 3299), ktorá vyžaruje studené svetlo. Teda snímaný povrch nebol ohriaty, vďaka čomu sa získali poznatky iba o vplyve osvetlenia. Druhú polovicu merania sa žiarivka vypla (poradové čísla odmerania vzdialenosti 3300 - 6360), teda snímaný povrch bol osvetlený iba denným svetlom. Namerané dáta sú na obr. 5.30, z ktorých je zrejmé overenie vplyvu osvetlenia. Počas prvej polovice merania sa stredná hodnota pohybuje zhruba o 1 mm nižšie ako počas druhej polovice snímania. Meranie sa dá opäť považovať za presné, keďže sa všetky namerané vzdialenosti nachádzajú jasne v intervale tolerancie I od priemernej odmeranej hodnoty vzdialenosti $\bar{l} = 64,79$ cm. Priemerná odmeraná vzdialenosť prvej (\bar{l}_1) a druhej (\bar{l}_2) polovice merania spolu s ich rozptylmi (σ_1^2) a (σ_2^2) sú uvedené v tabuľke 5.5. Z uvedených štatistických veličín je zrejmý vplyv osvetlenia, ale je zanedbateľný, keďže odmeraná vzdialenosť sa líšila iba o cca 0,08 cm a pri rozptyloch bol rozdiel iba 0,01 cm², čo sú zanedbateľné hodnoty vzhľadom k rozmerom robotov.



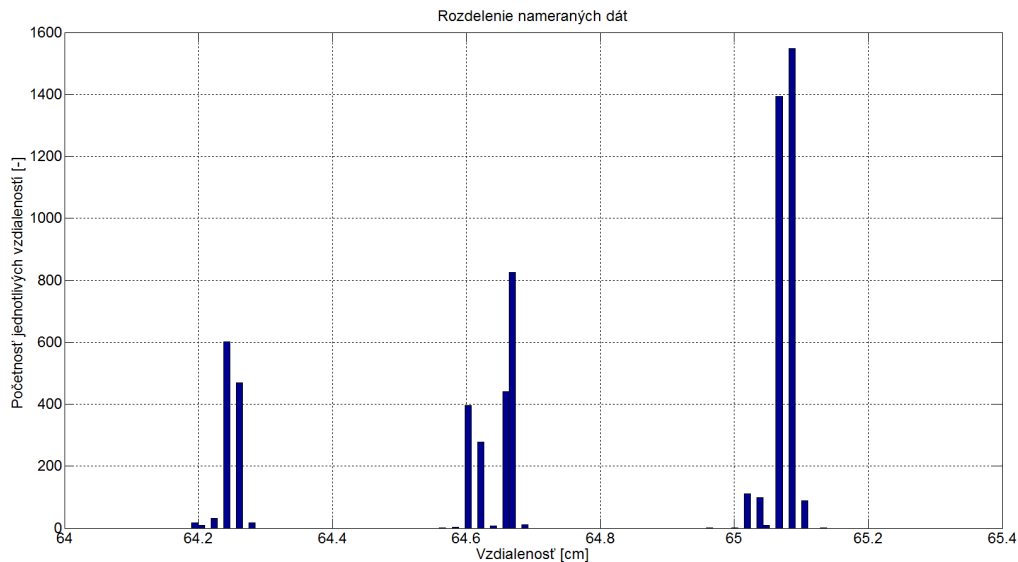
Obr. 5.30: Namerané dáta pri osvetlení steny žiarivkou

<i>Porovnanie štatistických veličín merania pri ovplyvnení žiarivkou</i>		
	1. polovica merania - žiarivka zapnutá	2. polovica merania - žiarivka vypnutá
Priemerná vzdialenosť \bar{l}_i [cm]	64,83	64,75
Rozptyl dát σ_i^2 [cm ²]	0,11	0,09

Tabuľka 5.5: Tabuľka porovnaných štatistických veličín merania pri zmene svetelných podmienok žiarivkou

Histogram nameraných dát je na obr. 5.31 a ako vidieť obsahuje 3 dĺžkové intervaly, pričom najvyšší z nich je s najväčšou početnosťou, a zároveň je aj najbližšie k skutočnej meranej vzdialenosti $l = 5$ cm.

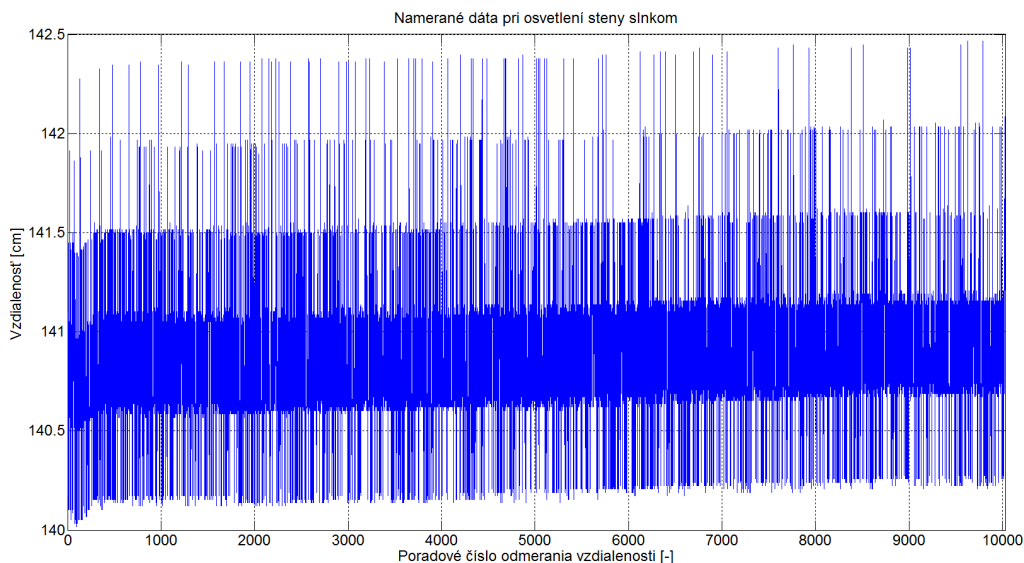
5.5. ŠTVRTÝ SÚBOR MERANÍ - UPRESNENIE VPLYVU SVETLA A TEPLoty



Obr. 5.31: Histogram nameraných dát pri meraní s osvetlením steny žiarivkou

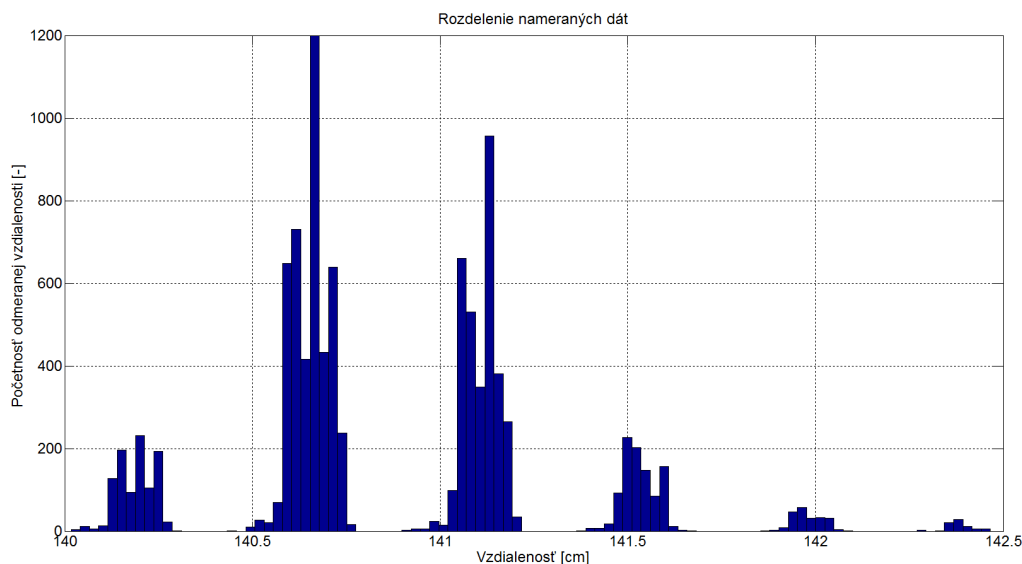
5.5.4. Meranie pri osvetlení snímaného povrchu slnkom

Prvý dojem tohoto merania môže vyvolať pocit, že je to opakovanie už realizovaných meraní, avšak v tomto prípade, svietilo slnko iba na snímanú stenu a doska *STM32 NUCLEO-F401RE* spolu s použitým senzorom boli v tieni. Meranie trvalo takmer 1,5 hodiny za denného svetla s frekvenciou snímania $f_s = 2 \text{ Hz}$, teda dvakrát za sekundu. Cieľom bolo overiť vplyv slnka (osvietenia a zároveň aj ohriatia) na snímanú plochu. Namerané dáta sú zobrazené na obr. 5.32, a aj v tomto prípade sa takmer všetky odmerania pohybovali v intervale tolerancie I od priemernej snímanej vzdialenosti $\bar{l}_1 = 140,89 \text{ cm}$ s nepresnosťami do $+6 \text{ mm}$ nad hornú hranicu intervalu, pri počte 291 z celkového počtu 10025 odmeraní. Ako z nameraných dát vidieť, zo začiatku merania ako slnko len začalo svietiť na snímanú plochu, (začal ohrev) tak stredná hodnota odmeranej vzdialenosti



Obr. 5.32: Namerané dáta pri osvetlení steny slnkom

má jemne rastúci trend. Keďže v predchádzajúcich meraniach bol overený vplyv svetla taký, že väčšie nasvetlenie snímaného povrchu znižuje odmeranú vzdialenosť, tak rastúci trend o približne 2 mm môže byť pripísaný ohriatiu steny. Rozdelenie nameraných dát je na obr. 5.33, ktoré je pomerne rozmanité, s dvomi silne početnými intervalmi dĺžok, ktoré sú aj širšie oproti iným intervalom dĺžok z predošlých meraní pri snímaní len jedným sensorom. Je to spôsobené opäť slnkom, respektíve ohrevom. Vďaka tomuto meraniu sa zistilo, že ohriatie snímaného povrchu zvyšuje odmeranú vzdialenosť a takisto zhoršuje rozdelenie nameraných dát, resp. ho robí rozmanitejším.



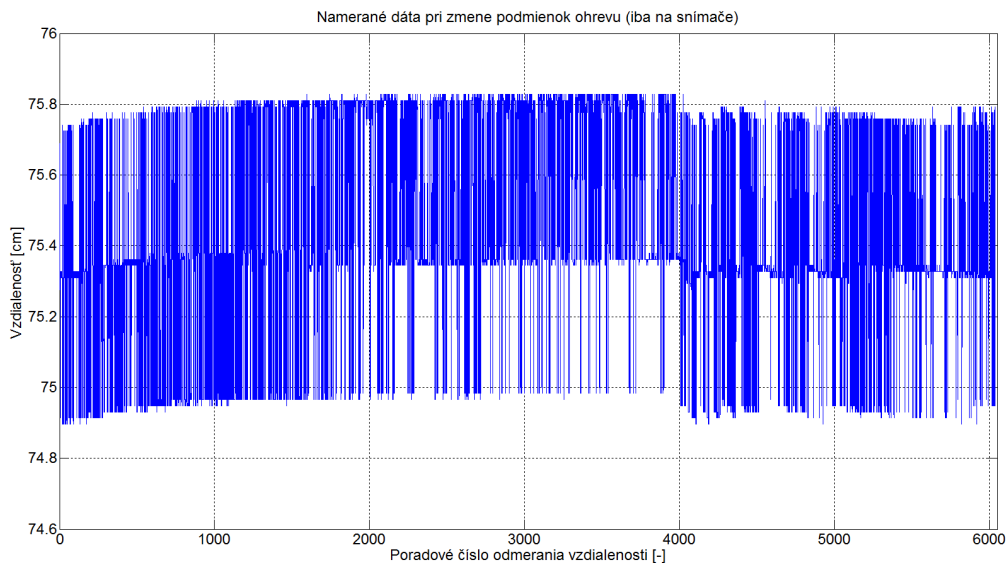
Obr. 5.33: Histogram nameraných dát pri meraní s osvetlením steny slnkom

5.5.5. Meranie pri zmene podmienok ohrevu pomocou IR svetla

Cieľom merania bolo zistiť, do akej miery ovplyvňuje ohrev sensoriky meranie. Pre ohrev bol použitý ohrievač, ktorý vyžaruje IR svetlo a bol zapnutý od začiatku merania približne 35 minút. Žiarenie ohrievača smerovalo tak, aby ohrieval iba sensoriku a nie snímanú stenu. Doba trvania snímania bola necelú hodinu, s frekvenciou snímania $f_s = 1,76 \text{ Hz}$, teda vzdialenosť sa odmerala jedenkrát za 0,55 sekundy pri dennom svetle. Namerané vzdialenosti sú na obr. 5.34, meranie je možné považovať za presné, keďže sa odmeraná vzdialenosť vždy pohybovala v intervale tolerancie I , a v tomto prípade rozdiel medzi maximálnou a minimálnou vzdialenosťou neprekročil hodnotu 1 cm. Meraná vzdialenosť bola $l = 75,5 \text{ cm}$. Z grafu vidieť, že ohrev spôsobil jemne rastúci trend strednej hodnoty odmeranej vzdialenosti od spustenia merania po dobu necelých 20 minút (poradové číslo odmerania vzdialenosti 1-1999). Ďalších približne 15 minút, kedy ohrievač stále sálal teplo, rastúci trend sa ustálil, avšak odmeraná vzdialenosť nadobúdala vyššie hodnoty ako keď sa ohrev vypol, čomu odpovedá posledná časť merania. Táto trvala približne 20 minút, pri ktorej stredná hodnota odmeranej vzdialenosti prudko klesla približne behom jednej minúty, ihneď po vypnutí ohrievača. Následne sa stredná hodnota ustálila na približne rovnakej hodnote ako bola na začiatku. Spomenutý prudký pokles strednej hodnoty je pozoruhodný, keďže sa očakávalo pomalšie ochladenie používanej sensoriky. Avšak, keďže

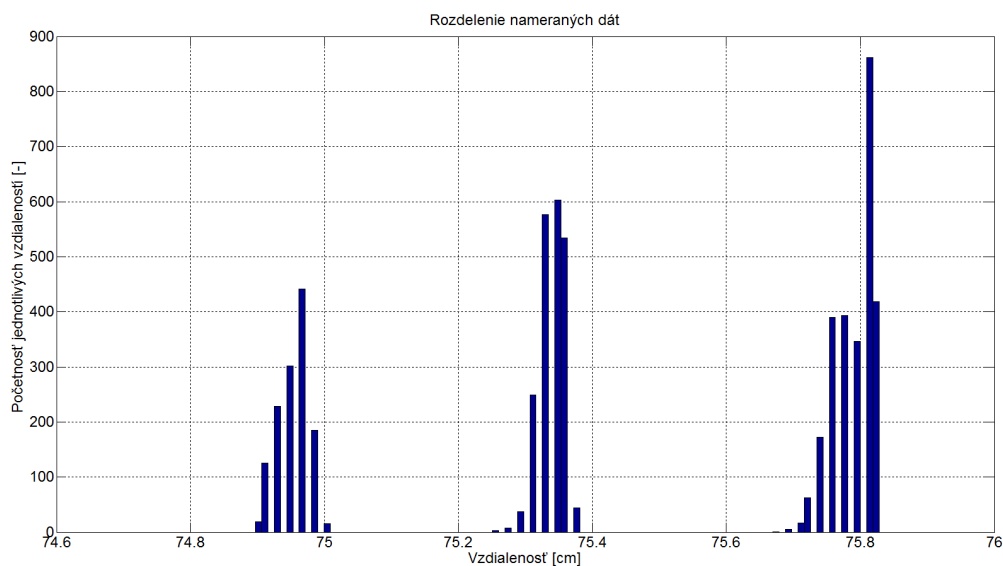
5.5. ŠTVRTÝ SÚBOR MERANÍ - UPRESNENIE VPLYVU SVETLA A TEPLoty

nárast strednej hodnoty bol len minimálny, približne 0,5 mm, dá sa považovať vplyv ohrevu senzoričky za zanedbateľný vzhľadom k reálnym rozmerom robotov a ich použitiu.



Obr. 5.34: Namerané dáta pri zmene podmienok ohrevu snímačov

Rozdelenie nameraných je zobrazené na obr. 5.35 a obsahuje 3 dĺžkové intervaly.



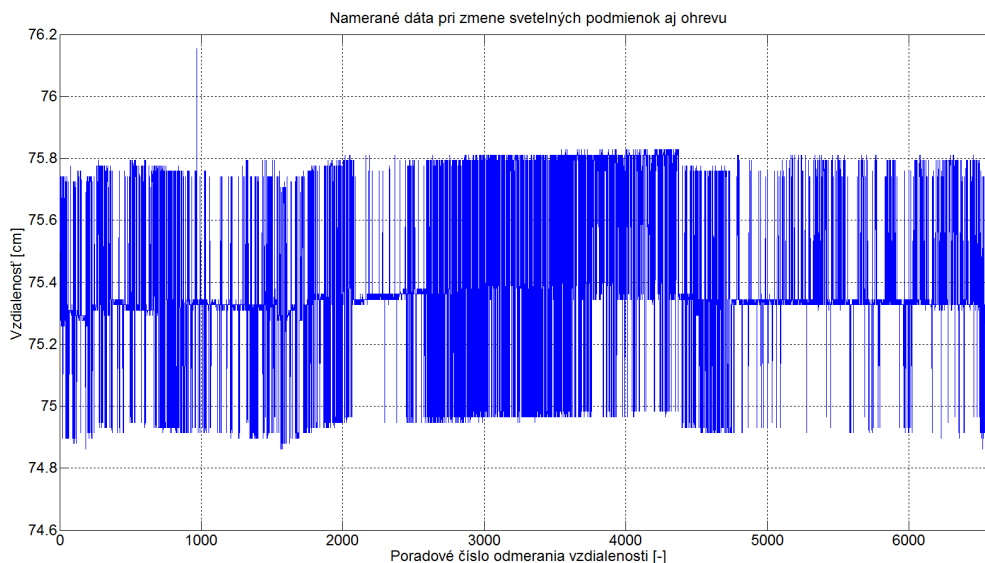
Obr. 5.35: Histogram nameraných dát pri zmene podmienok ohrevu snímačov

5.5.6. Meranie pri zmene podmienok nasvietenia aj ohrevu pomocou IR a UV svetla

Posledným meraním z tohoto súboru som chcel overiť doposiaľ zistené informácie. Preto bola zvolená metóda ohrevu aj nasvietenia jak senzoričky, tak aj snímanej plochy. Ako zdroj svetla a sálavého tepla bola použitá "solux lampa", ktorá obsahuje výbojku pre UV žiarenie a dve infratrubičky, ktoré vyžarujú IR svetlo pre ohrev. Namerané dáta sú

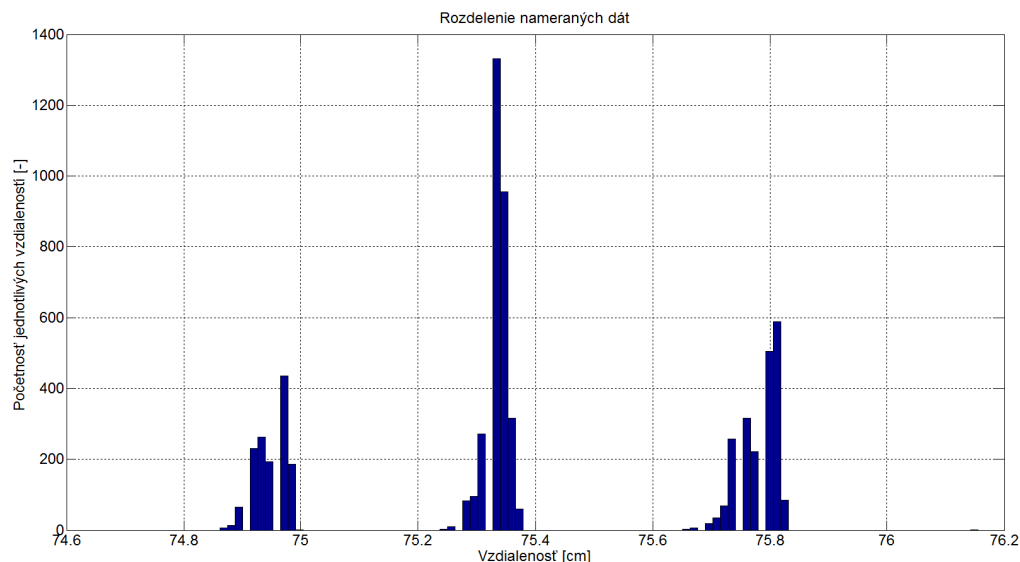
5. MERANIE - ZISŤOVANIE VLASTNOSTÍ SNÍMAČOV

na obr. 5.36 a meranie sa dá považovať opäť za presné, keďže sa odmerané vzdialenosti pohybovali v intervale tolerancie I . Snímaná vzdialenosť bola opäť $l = 75,5 \text{ cm}$, meranie trvalo približne hodinu, s rovnakou frekvenciou snímania vzdialenosti ako pri predchádzajúcom meraní, teda $f_s = 1,76 \text{ Hz}$. Prvá časť merania trvala približne 20 minút (poradové čísla odmerania vzdialenosti približne 1-2100), počas ktorých bolo použité IR aj UV svetlo a svietilo na senzoriku aj na snímanú stenu. Stredná hodnota odmeranej vzdialenosti v prvej časti kolíše okolo hodnoty $74,3 \text{ mm}$, čomu sa dá pripísať vplyv jak osvetlenia tak aj ohrevu, keďže sa stena aj senzorika pomaly ohrievali. V druhej časti merania bola lampa vypnutá, teda podmienky merania boli pri izbovej teplote a dennom osvetlení. Táto časť trvala takisto približne 20 minút (poradové čísla odmerania vzdialenosti približne 2101-4200). Odmeraná vzdialenosť sa pohybovala v intervale tolerancie I a nelíšila sa nijak významne oproti doterajším meraniam pri rovnakých podmienkach. Tretia časť znovu trvala cca 20 minút (poradové čísla odmerania vzdialenosti približne 4201-6400), boli použité oba zdroje svetla aj ohrevu, a žiarili iba na stenu. Stredná hodnota odmeranej vzdialenosti klesla o veľmi málo, až zanedbateľne, oproti druhej časti merania, avšak dalo by sa povedať, že tretia časť merania bola pomerne najpresnejšia, keďže odmeraná vzdialenosť najmenej kolísala. To, že sa stredná hodnota takmer nezmenila je spôsobené tým, že osvetlenie znižuje odmeranú vzdialenosť, avšak ohrev ju zvyšuje takže je predpoklad že tieto vplyvy sa vzájomne "vyrušili" pri tak malých vplyvoch. V konečnom dôsledku to meranie takmer neovplyvnilo, prípadne len zlepšilo presnosť v tretej časti merania.



Obr. 5.36: Namerané dáta pri zmene podmienok osvetlenia aj ohrevu

Rozdelenie nameraných dát je na obr. 5.37 a obsahuje 3 dĺžkové intervaly. Prostredný z nich má najvyššiu početnosť, a pravdepodobne odpovedá tretej časti merania. Štatistické veličiny jednotlivých častí merania sú uvedené v tabuľke 5.6, a ako vidieť, veľké rozdiely medzi nimi nie sú. Týmto súborom meraní sa nakoniec potvrdili vplyvy pri snímaní vzdialenosti senzormi SRF05, a to že pri lepších svetelných podmienkach, resp. osvetlení prostredia snímače merajú väčšiu vzdialenosť o niekoľko milimetrov, a ohrev prostredia má zas opačný vplyv.



Obr. 5.37: Histogram nameraných dát pri zmene podmienok osvetlenia aj ohrevu

<i>Porovnanie statist. veličín merania pri zmene osvetlenia aj ohrevu UV a IR svetlom</i>			
	1. časť merania	2. časť merania	3. časť merania
Priemerná vzdialenosť \bar{l}_i [cm]	75,34	75,43	75,41
Rozptyl dát σ_i^2 [cm ²]	0,09	0,12	0,07

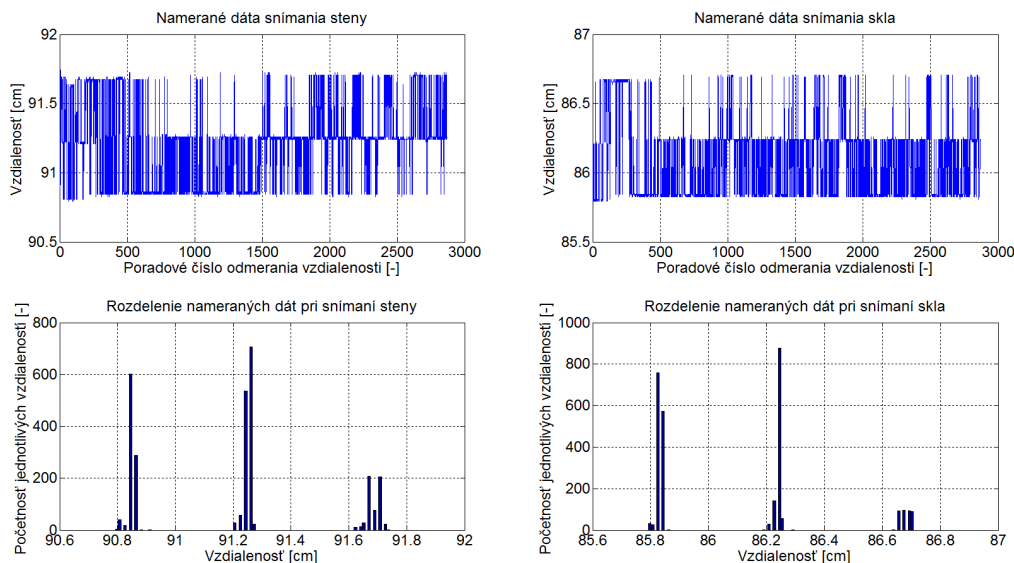
Tabuľka 5.6: Tabuľka porovnaných štatistických veličín meraní pri zmene osvetlenia aj ohrevu UV a IR svetlom

5.6. Piaty súbor meraní - zisťovanie vplyvu na zmeny materiálu snímanej plochy

Ako z nadpisu podkapitoly vyplýva, súbor týchto meraní je zameraný na zistenie vplyvu povrchu materiálu snímanej plochy. Meraní sa uskutočnilo celkovo desať a vždy pomocou jedného snímača. Každé meranie trvalo 30 minút s frekvenciou snímania vzdialenosti $f_s = 1,6 \text{ Hz}$, resp. jedenkrát za 0,6 sekundy. Merania prebiehali tak, že sensorika bola staticky umiestnená na jednom mieste a na stenu sa buď zavesil alebo sa o stenu oprel daný snímaný materiál. Z dôvodu že sa materiály menili na jednom mieste, sa snímaná vzdialenosť pri každom meraní líši o pár centimetrov, čo bolo spôsobené spomenutým opretím/zavesením. Základná vzdialenosť snímanej steny bola $l = 91 \text{ cm}$ a snímané materiály boli *biela stena, sklenená priehľadná tabuľa, drevená doska, doska z drevotriessky, koberec (šedivý), textilná biela plachta, mosadzný plech, ocelový hnedý plech, guma a polystyrén*. Pri všetkých meraniach bola porovnávaná presnosť z dvoch hľadísk. Prvé hľadisko bolo rozdiel medzi priemernou odmeranou vzdialenosťou \bar{l}_i a skutočnou vzdialenosťou merania l_i . Druhé hľadisko bolo do akej miery snímač meral vzdialenosť presne od priemernej hodnoty merania (interval tolerancie).

Snímanie vzdialenosti $l_b s = 91 \text{ cm}$ od bielej steny a takisto snímanie vzdialenosti $l_s = 86 \text{ cm}$ od sklenenej tabule je možné považovať za presné z oboch sledovaných hľadísk. Všetky namerané vzdialenosti oboch meraní sa pohybovali v intervale $\pm 0,5 \text{ cm}$

od ich priemerných hodnôt \bar{l}_i , čo je polovica šírky intervalu tolerance I , ktorý má hranice $\pm 1 \text{ cm}$. Pri snímaní bielej steny bola priemerná odmeraná vzdialenosť $\bar{l}_{bs} = 91,20 \text{ cm}$ s rozptylom $\sigma_{bs}^2 = 0,09 \text{ cm}^2$ a rozdielom skutočnej a priemernej vzdialenosti $\Delta l_{bs} = +0,20 \text{ cm}$. Pri snímaní sklenenej tabule bola priemerná hodnota $\bar{l}_s = 86,10 \text{ cm}$ s rozptylom $\sigma_s^2 = 0,09 \text{ cm}^2$ a rozdielom skutočnej a priemernej vzdialenosti $\Delta l_d = +0,10 \text{ cm}^2$. Namerané dáta oboch meraní a ich histogramy sú na obr. 5.38. Ako vidieť z histogramov, oba obsahujú 3 intervaly odmeraných dĺžok. Pri snímaní bielej steny, prostredný dĺžkový interval odpovedá priemernej hodnote odmeranej vzdialenosti \bar{l}_i , avšak pri snímaní skla je priemerná hodnota odmeranej vzdialenosti medzi prvým a druhým dĺžkovým intervalom.

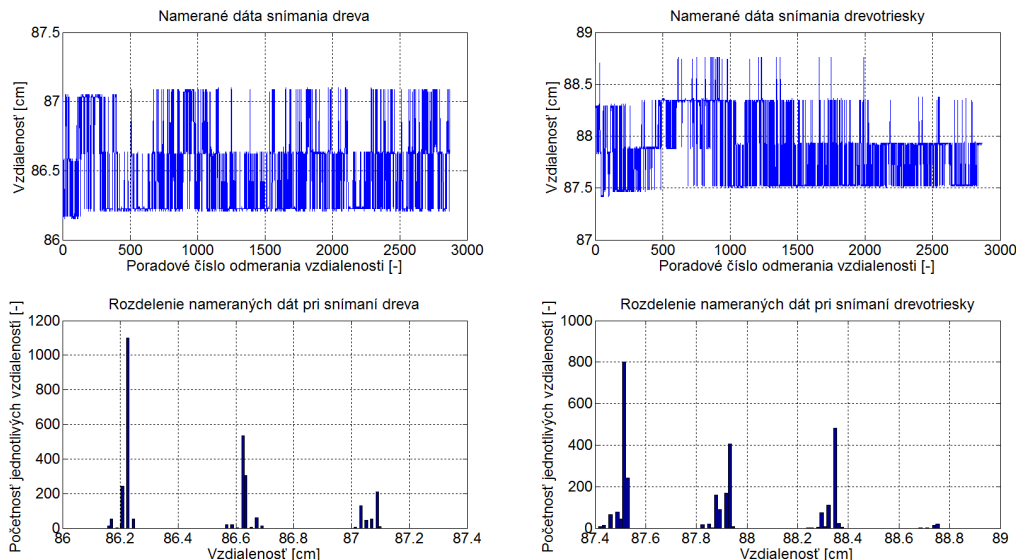


Obr. 5.38: Namerané dáta a ich rozdelenie pri snímaní steny a skleneného povrchu

Nasledujúce snímanie vzdialenosti $l_d = 86,5 \text{ cm}$ od drevenej dosky je považované taktiež za presné z oboch hľadísk. Všetky hodnoty odmeranej vzdialenosti sa pohybovali v zúženom intervale tolerance $\pm 0,5 \text{ cm}$ od priemernej vzdialenosti $\bar{l}_d = 86,49 \text{ cm}$ s rozptylom nameraných dát $\sigma_d^2 = 0,10 \text{ cm}^2$. Rozdiel priemernej odmeranej a skutočnej vzdialenosti je v tomto prípade $\Delta l_d = -0,01 \text{ cm}$. Meranie vzdialenosti $l_{dt} = 88 \text{ cm}$ od dosky z drevotriesky považujeme taktiež za presné, keďže rozdiel priemernej a skutočnej vzdialenosti bol iba $\Delta l_{dt} = -0,15 \text{ cm}$. Presnosť tohoto merania bola takisto dobrá, keďže sa všetky odmerané vzdialenosti nachádzali v intervale tolerance I od priemernej hodnoty tohoto merania $\bar{l}_{dt} = 87,85 \text{ cm}$ s rozptylom dát $\sigma_{dt}^2 = 0,12 \text{ cm}^2$. Namerané dáta a rozdelenia oboch spomenutých meraní sú na obr. 5.39. Histogram nameraných dát snímania drevenej dosky je veľmi podobný histogramom meraní steny a skla. Takisto obsahuje 3 dĺžkové intervaly, pričom prvý je najdominantnejší a hodnoty tretieho intervalu nadobúdajú najnižšie početnosti. Priemerná hodnota snímania drevenej dosky leží medzi prvými dvoma intervalmi. Histogram merania drevotriesky obsahuje 4 intervaly dĺžok, avšak posledný je takmer zanedbateľný, keďže sa jedná iba o niekoľko desiatok odmeraných hodnôt. Priemerná hodnota snímania drevotriesky leží v druhom intervale odmeraných vzdialeností.

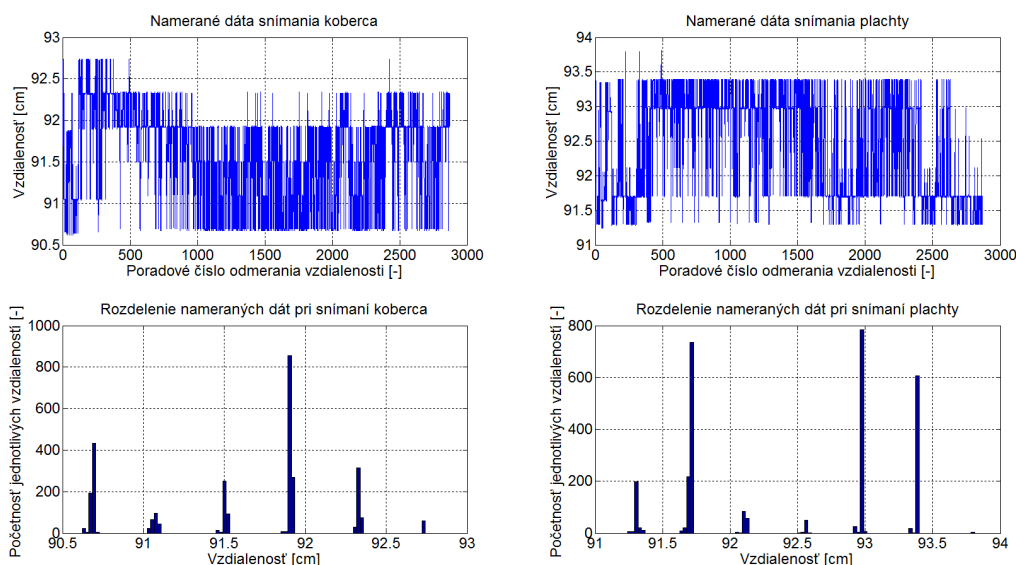
V piatom meraní bol snímanou plochou tkaný syntetický koberec vzdialený $l_k = 90 \text{ cm}$ a v šiestom meraní bola snímaná textilná plachta vzdialená $l_t = 91 \text{ cm}$. Obe tieto merania sú považované za nepresné z oboch hľadísk, pretože rozdiel priemernej a skutočnej vzdia-

5.6. PIATY SÚBOR MERANÍ - ZISŤOVANIE VPLYVU NA ZMENY MATERIÁLU SNÍMANEJ PLOCHY



Obr. 5.39: Namerané dáta a ich rozdelenie pri snímaní drevo a drevotriesky

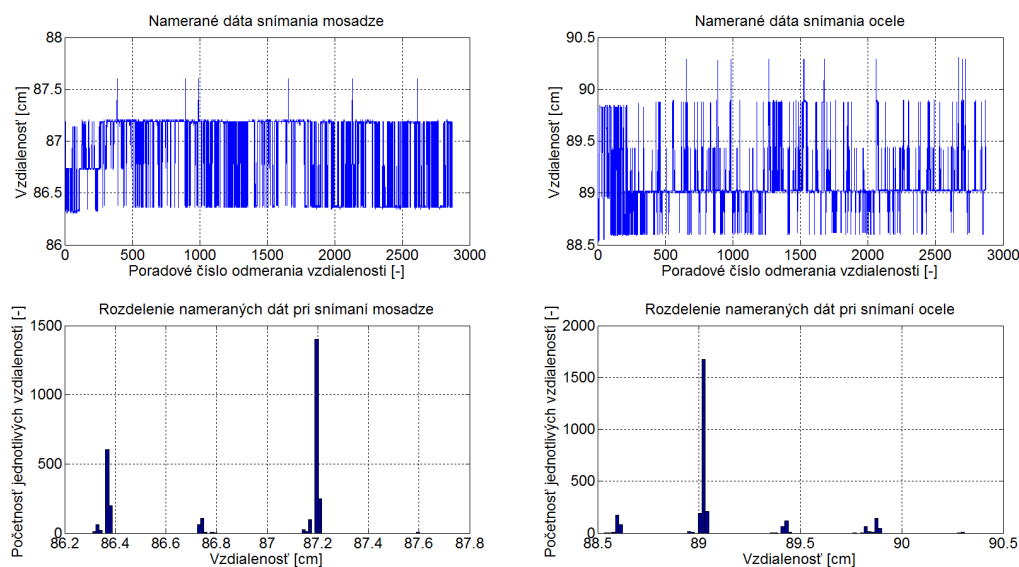
lenosti bol až $\Delta l_k = +1,59 \text{ cm}$ v prípade koberca a pre prípad textílie bol spomínaný rozdiel $\Delta l_t = +1,44 \text{ cm}$. Z pohľadu prvého hľadiska (presnosti), pri snímaní koberca sa namerané hodnoty pohybovali v intervale tolerance I od priemernej nameranej hodnoty, avšak pri snímaní plachty sa ani toto hľadisko nesplnilo. Namerané dáta oboch meraní a ich rozdelenia sú na obr. 5.40. Pri snímaní koberca bola priemerná odmeraná vzdialenosť $\bar{l}_k = 91,59 \text{ cm}$ s rozptylom dát $\sigma_k^2 = 0,36 \text{ cm}^2$. Rozdelenie nameraných dát obsahuje až 6 dĺžkových intervalov, z ktorých štvrtý v poradí má najväčšiu početnosť. Posledný interval má najnižšiu početnosť, a tento interval reprezentuje odmerané hodnoty vzdialenosti, ktoré sú mimo interval tolerance I . Snímanie textilnej plachty malo priemernú odmeranú hodnotu $\bar{l}_t = 92,44 \text{ cm}$ s rozptylom dát $\sigma_t^2 = 0,58 \text{ cm}^2$.



Obr. 5.40: Namerané dáta a ich rozdelenie pri snímaní koberca a textílie

5. MERANIE - ZISŤOVANIE VLASTNOSTÍ SNÍMAČOV

V nasledujúcom, siedmom meraní, bol zvolený mosadzný plech ako snímaná plocha, vzdialená $l_m = 86,5 \text{ cm}$. Toto meranie považujem za presné, z oboch skúmaných hľadísk. Rozdiel priemernej a skutočnej vzdialenosti je $\Delta l_m = 0, +40 \text{ cm}$, ktorý je o pár milimetrov väčší ako pri zvyšných meraniach považovaných za presné. Presnosť odmeraných vzdialeností vzhľadom k priemernej hodnote sa v tomto prípade pohybovala v intervale tolerancie I pre všetky hodnoty. Priemerná odmeraná vzdialenosť snímania mosadzného plechu vyšla $\bar{l}_m = 86,90 \text{ cm}$ s rozptylom nameraných dát $\sigma_m^2 = 0,15 \text{ cm}^2$. Histogram odmeraných vzdialeností snímania mosadzného plechu obsahuje 3 intervaly dĺžok, pričom tretí má výrazne dominantnú početnosť a druhý zas naopak výrazne nízku početnosť. Namerané dáta spolu s histogramom sú na obr. 5.41 pre snímanú mosadznú plochu, ale aj pre nasledujúce meranie. Pri ôsmom meraní bol snímaný oceľový plech vzdialený $l_o = 89 \text{ cm}$, a toto meranie je považované takisto za presné z oboch hľadísk, keďže rozdiel priemernej a skutočnej vzdialenosti je iba $\Delta l_o = +0,09 \text{ cm}$, s presnosťou všetkých odmeraných vzdialeností v intervale tolerancie I . Priemerná odmeraná vzdialenosť v tomto meraní bola $\bar{l}_o = 89,09 \text{ cm}$ s rozptylom $\sigma_o^2 = 0,10 \text{ cm}^2$.

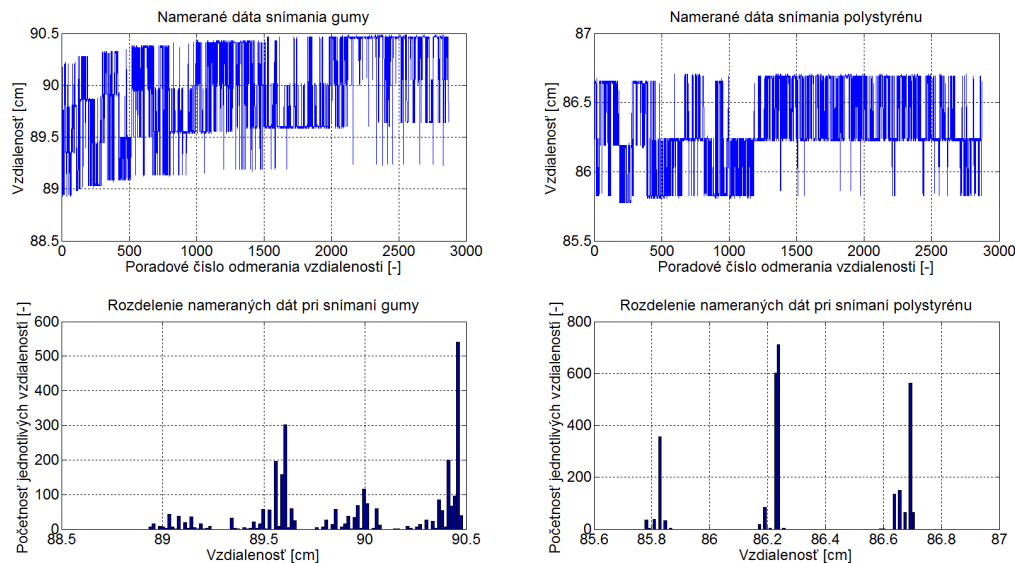


Obr. 5.41: Namerané dáta a ich rozdelenie pri snímaní mosadze a ocele

V predposlednom meraní bol zvolený ako snímaný povrch pogumovaná zadná strana použitého koberca z piateho merania tohoto súboru. V tomto prípade snímaná vzdialenosť $l_g = 90 \text{ cm}$. Z neznámych dôvodov sa vyskytla výrazná časová konštanta τ , ktorá trvala približne 10 minút. Aj napriek výskytu časovej konštanty považujeme meranie za presné z oboch hľadísk. Rozdiel priemernej a skutočnej vzdialenosti vyšiel $\Delta l_g = -0,04 \text{ cm}$ vypočítaný zo zistenej priemernej odmeranej vzdialenosti $\bar{l}_g = 89,96 \text{ cm}$ s rozptylom nameraných dát $\sigma_g^2 = 0,20 \text{ cm}^2$. Z druhého hľadiska považujem meranie takisto za presné, keďže namerané vzdialenosti sa pohybujú v intervale tolerancie tohoto merania. Namerané dáta predposledného aj posledného merania sú na obr. 5.42 spolu s ich rozdelením. Histogram predposledného merania gumeného povrchu je veľmi rozmanitý, čo je spôsobené spomenutou časovou konštantou, avšak obsahuje dva pomerne široké, ale početné intervaly, medzi ktorými leží priemerná vzdialenosť merania. Pre posledné meranie, bola ako snímaný povrch zvolená tabuľa z polystyrénu, vzdialená $l_p = 86 \text{ cm}$. Priemerná odmeraná vzdialenosť vyšla $\bar{l}_p = 86,32 \text{ cm}$ a pri rozptyle dát $\sigma_p^2 = 0,09 \text{ cm}^2$ aj toto meranie

5.6. PIATY SÚBOR MERANÍ - ZISŤOVANIE VPLYVU NA ZMENY MATERIÁLU SNÍMANEJ PLOCHY

je považované za presné. Z prvého hľadiska, pri ktorom bol rozdiel priemernej a skutočnej vzdialenosti $\Delta l_p = +0,32 \text{ cm}$, čo je považované za dostatočne presné. Pri druhom hľadisku, je snímanie polystyrénu považované takisto za presné, keďže všetky odmerané vzdialenosti sa pohybovali v intervale tolerance merania I .



Obr. 5.42: Namerané dáta a ich rozdelenie pri snímaní gummy a polystyrénu

<i>Porovnanie štatist. veličín merania pri zmene snímaného povrchu</i>				
Materiál	Skutočná vzdialenosť l_x [cm]	Priemerná odmeraná vzdialenosť \bar{l}_i [cm]	Rozdiel priemernej a skutočnej vzdialenosti Δl [cm]	Rozptyl merania σ_i^2 [cm ²]
Biela stena	91	91,20	+0,20	0,09
Sklo	86	86,10	+0,10	0,09
Drevo	86,5	86,49	-0,01	0,10
Drevotrieska	88	87,85	-0,15	0,12
Koberec	90	91,59	+1,59	0,36
Textilná plachta	91	92,44	+1,44	0,58
Mosadz	86,5	86,90	+0,40	0,15
Oceľ	89	89,09	+0,09	0,10
Guma	90	89,96	-0,04	0,20
Polystyrén	86	86,32	+0,32	0,09

Tabuľka 5.7: Tabuľka porovnaných štatistických veličín pre merania pri snímaní rôznych povrchov

Pre zhodnotenie a prehľadnosť sú štatistické veličiny všetkých meraní uvedené v tabuľke 5.7. Týmto súborom meraní sa zistilo, ktoré materiály sú vhodné a ktoré sú menej vhodné pre použitie ako snímaný povrch ultrazvukovými senzormi. Teda, ako presne snímače merajú pre rôzne materiály. Za vhodné materiály sú považované stena, resp. farba

na maľovanie stien, sklo, drevo, drevotrieska, oceľ a zo štatistického hľadiska aj guma (avšak pri tomto meraní sa vyskytla časová konštanta), keďže sa pri nich nezistili nejaké výrazné ovplyvnenie merania. V prípade mosadze a polystyrénu sú tieto materiály ešte prijateľné, aj keď boli snímané o niekoľko milimetrov ďalej než reálne boli umiestnené. Materiály na textilnej báze, teda syntetické koberce alebo textilné plachty nie sú veľmi vhodné, keďže pri týchto materiáloch rozdiely priemerne odmeranej a skutočnej vzdialenosti sú najväčšie. Z pohľadu rozmanitosti histogramov nameraných dát sú vhodnejšie tvrdšie materiály než mäkké, pretože pri tvrdých materiáloch snímače merali menšie počty intervalov dĺžok, než pri mäkkých materiáloch. Najúžšie súbory zosnímaných intervalov vzdialeností mali materiály, biela farba na stene, priesvitné sklo, drevo a polystyrén.

5.7. Šiesty súbor meraní - zisťovanie vyžarovacieho tvaru snímačov

Jednou z ďalších úloh tejto diplomovej práce bolo zistiť, aký tvar má vyžarovaný ultrazvuk, pomocou ktorého bude zistená oblasť (zóna) detekcie. Predpokladom je, že tvar ultrazvuku je kužeľovitý s vrcholom vo vysielacom piezoelektrickom meniči. V datasheete síce nie je uhol vrcholu uvedený, ale niektorý z internetových predajcov týchto snímačov uvádzal, že by tento vrcholový uhol oblasti detekcie ultrazvuku α by mal byť do 15° . Skúmanie tvaru vyžarovaného ultrazvuku sa vykonalo pomocou štyroch snímačov, v stanovených vzdialenostiach $l = \{0,75 \text{ m}, 1,5 \text{ m}, 3 \text{ m}\}$. Merania prebiehali tak, že senzory sa postupne umiestňovali do vzdialenosti, ktorá bola o niekoľko centimetrov väčšia, než pri akej boli tvary skúmané. Pomocou laserového svetla a presného vymerania sa zaznačila značka na stenu, kde by sa na stene snímač nachádzal a spustilo sa meranie vzdialenosti. Následne, sa v požadovanej vzdialenosti začala pomaly vsúvať drevená doska zo strán (sprava, zľava, zvrchu a zospodu) smerom ku stredu snímača, a sledovalo sa, kedy bude táto doska snímačom zosnímaná v oblasti detekcie ultrazvuku. Keď bola drevená doska detekovaná, tak sa odmerala vzdialenosť hranice zóny detekcie v príslušnom smere od značky stredu snímača, a táto vzdialenosť sa zapísala. Takýmto spôsobom boli sledované rozmery tvaru vyžarovaného ultrazvuku pri stanovených vzdialenostiach l . Namerané rozmery pre jednotlivé smery, senzory a snímané vzdialenosti sú uvedené v tabuľke 5.8.

Z uvedených rozmerov pre príslušnú vzdialenosť sa následne pomocou goniometrickej funkcie *tangens* jednoducho vypočítali odpovedajúce uhly α_x . Ako vidieť v tabuľke 5.8 nie sú uvedené rozmery zdola pre snímanú vzdialenosť 3 m , z dôvodu že bolo problematické umiestniť snímače do potrebnej výšky, aby sa dala snímaná drevená doska posúvať zospodu do stredu vyžarovaného ultrazvuku. Preto nie sú uvedené ani odpovedajúce uhly pre túto vzdialenosť v tabuľkách 5.9 a 5.10.

Uhly pre smery sprava a zľava sa počítali, a získal sa horizontálny vrcholový uhol tvaru vyžarovaného ultrazvuku snímača, a zase uhly smerov zvrchu a zospodu boli počítané, pre získanie vertikálneho uhlu.

Zo zistených dát sa potvrdila informácia uvedená internetovým predajcom, že uhly vyžarovaného ultrazvuku majú byť menšie ako 15° . Možno to predajca sám premeral. Ťažko povedať, pri ktorej snímanej vzdialenosti sa získali najpresnejšie hodnoty, keďže presné odmeranie rozmeru kedy doska začala byť detekovaná bolo problematické. Navyše výsledné uhly pri snímanej vzdialenosti $1,5 \text{ m}$ vyšli najväčšie oproti snímaným vzdialenostiam $l = 0,75 \text{ m}$ a $l = 3 \text{ m}$. Avšak, rozdiely nie sú až tak veľké, takže niektoré z meraní

5.7. ŠIESTY SÚBOR MERANÍ - ZISŤOVANIE VYŽAROVACIEHO TVARU SNÍMAČOV

<i>Tabuľka nameraných rozmerov vyžarovaného ultrazvuku senzorov</i>				
Zistené rozmery [cm]	1. snímač	2. snímač	3. snímač	4. snímač
Snímaná vzdialenosť: 0,75 m				
Sprava	6	7	6	7
Zľava	8	7,5	7,5	7,5
Zhora	8	7	7	6
Zdola	8	7,5	7,5	8,5
Snímaná vzdialenosť: 1,5 m				
Sprava	20	22	19	20
Zľava	15	18	16	15
Zhora	18	20	19	17
Zdola	20	19	14	18
Snímaná vzdialenosť: 3 m				
Sprava	17	24	23	28
Zľava	33	25	38	30
Zhora	20	20	14	25
Zdola	-	-	-	-

Tabuľka 5.8: Tabuľka nameraných rozmerov vyžarovaného ultrazvuku senzorov pre snímané vzdialenosti

<i>Tabuľka vypočítaných uhlov vyžarovaných ultrazvukov senzorov</i>				
Vypočítaný uhol α_x [°]	1. snímač	2. snímač	3. snímač	4. snímač
Snímaná vzdialenosť: 0,75 m				
Sprava	4,60	5,37	4,60	5,37
Zľava	6,14	5,75	5,75	5,75
Zhora	6,14	5,37	5,37	4,60
Zdola	6,14	5,75	5,75	6,52
Snímaná vzdialenosť: 1,5 m				
Sprava	7,69	8,47	7,30	7,69
Zľava	5,75	6,91	6,14	5,75
Zhora	6,91	7,69	7,30	6,52
Zdola	7,69	7,30	5,37	6,91
Snímaná vzdialenosť: 3 m				
Sprava	3,25	4,60	4,40	5,37
Zľava	6,33	4,79	7,30	5,75
Zhora	3,83	3,83	2,87	4,79
Zdola	-	-	-	-

Tabuľka 5.9: Tabuľka vypočítaných uhlov vyžarovaných ultrazvukov senzorov pre snímané vzdialenosti

mohlo byť nepresné, a takisto kus od kusu môže mať rozdielny uhol o jeden až dva stupne.

<i>Tabuľka výsledných uhlov vyžarovaných ultrazvukov sensorov</i>				
Vypočítaný finálny uhol α_x [°]	1. snímač	2. snímač	3. snímač	4. snímač
Snímaná vzdialenosť: 0,75 m				
Horizontálny	10,73	11,12	10,35	11,12
Vertikálny	12,28	11,12	11,12	11,12
Snímaná vzdialenosť: 1,5 m				
Horizontálny	13,44	15,38	13,44	13,44
Vertikálny	14,60	14,99	12,67	13,44
Snímaná vzdialenosť: 3 m				
Horizontálny	9,58	9,39	11,70	11,12
Vertikálny	-	-	-	-

Tabuľka 5.10: Tabuľka výsledných uhlov vyžarovaných ultrazvukov sensorov pre snímané vzdialenosti

Ďalšou vlastnosťou niektorých snímačov vo všeobecnosti je, že na konci meracieho rozsahu býva zóna detekcie zúžená.

5.8. Siedmy súbor meraní - vzájomné rušenie snímačov pri meraní v rohu

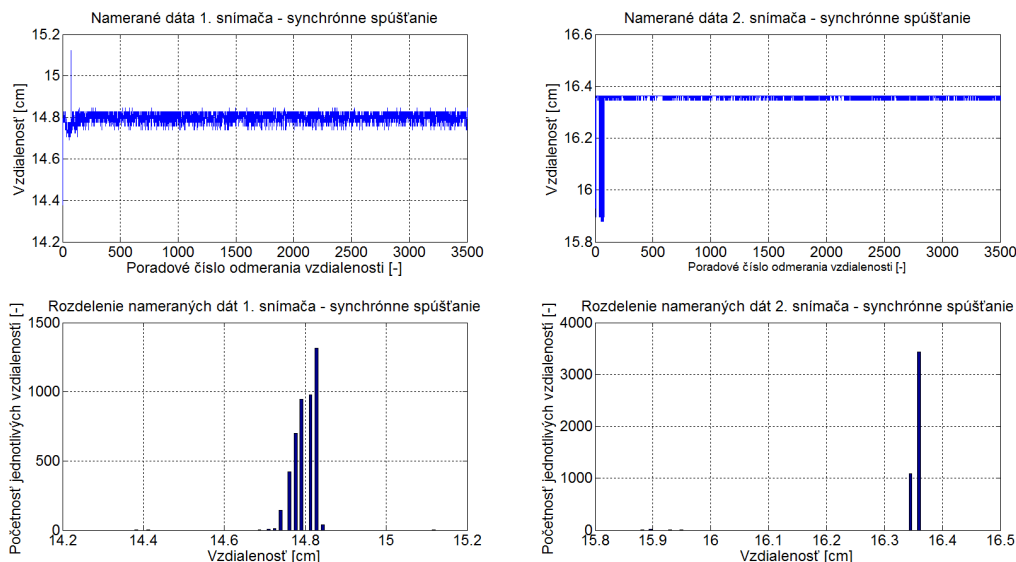
Posledným súborom meraní bolo zistiť, do akej miery sa snímače vzájomne ovplyvňujú. Merania prebiehali tak, že sa vždy dva snímače umiestnili do rohu miestnosti v stanovenej vzdialenosti, a každý z nich snímal inú stenu. Cieľom bolo zistiť, či každý snímač meral vždy iba svoju vzdialenosť od steny, alebo či sa stane aj prípad, že prijme odrazený ultrazvuk iného snímača a odmeria teda úplne inú vzdialenosť. Každé snímanie vzdialenosti sa uskutočnilo vždy dvakrát (kvôli zmene spôsobu spúšťania), pri snímaní buď rovnakých vzdialeností (umiestnenie uhlopriečne voči rohu miestnosti), alebo rozdielnych vzdialenostiach (umiestnenie mimo uhlopriečku vzhľadom k rohu miestnosti). Merania boli uskutočnené oboma druhmi spúšťania, so synchronným aj so sekvenčným.

5.8.1. Snímanie malej vzdialenosti do 20 cm

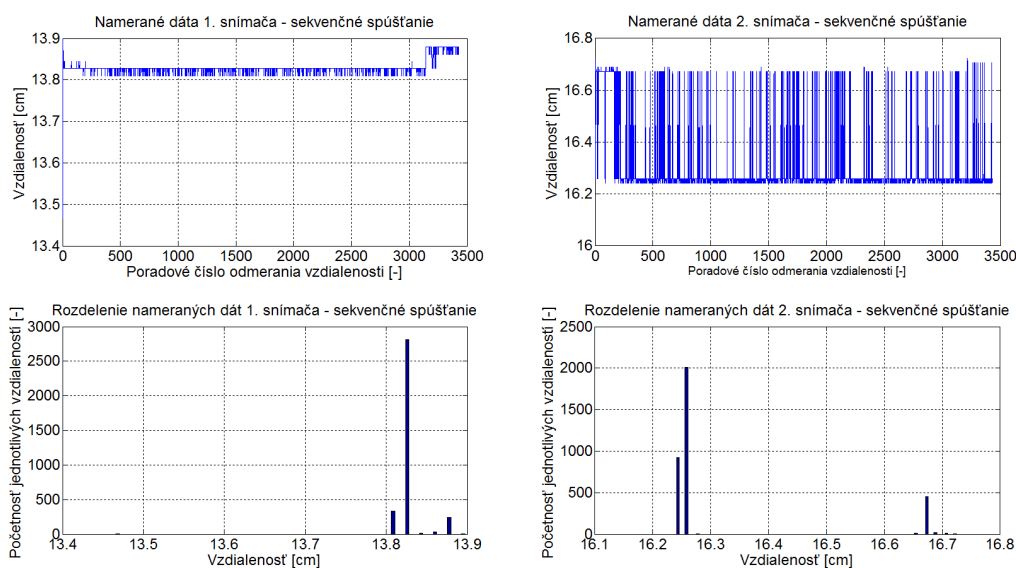
Pri tomto meraní boli snímače umiestnené takmer uhlopriečne vzhľadom k rohu miestnosti. Jeden snímač bol vzdialený $l_2 = 16,5 \text{ cm}$ od steny, v oboch prípadoch spúšťania. Druhý zas bol vzdialený od steny $l_1 = 15 \text{ cm}$ pri synchronnom spúšťaní a $l_1 = 14 \text{ cm}$ pri sekvenčnom spúšťaní. Obe merania trvali hodinu, vzhľadom k tomu že ide iba o zistenie, či snímače merajú svoju správnu vzdialenosť, nie je podstatné uvádzať frekvenciu snímania f_s vzdialenosti. Zrejme stačí uviesť, že frekvencie snímania pri oboch meraniach sa líšili, keďže ide aj o rozdielne spôsoby spúšťania. Namerané dáta oboch meraní sú na obr. 5.43 pre synchronne spúšťanie a na obr. 5.44 pre sekvenčné spúšťanie.

Z nameraných dát je zrejmé, že snímače odmerali vždy svoju správnu vzdialenosť v rámci tolerancie $\pm 0,5 \text{ cm}$. Nestalo sa ani v jednom prípade, že by snímač zosnímal vzdialenosť výrazne odlišnú alebo vzdialenosť druhého senzoru. Meranie je považované za presné, keďže sa všetky odmerané vzdialenosti pohybovali v intervaloch $\pm 0,5 \text{ cm}$

5.8. SIEDMY SÚBOR MERANÍ - VZÁJOMNÉ RUŠENIESNÍMAČOV PRI MERANÍ V ROHU



Obr. 5.43: Namerané dáta a ich rozdelenie pri použití synchronného spúšťania



Obr. 5.44: Namerané dáta a ich rozdelenie pri použití sekvenčného spúšťania

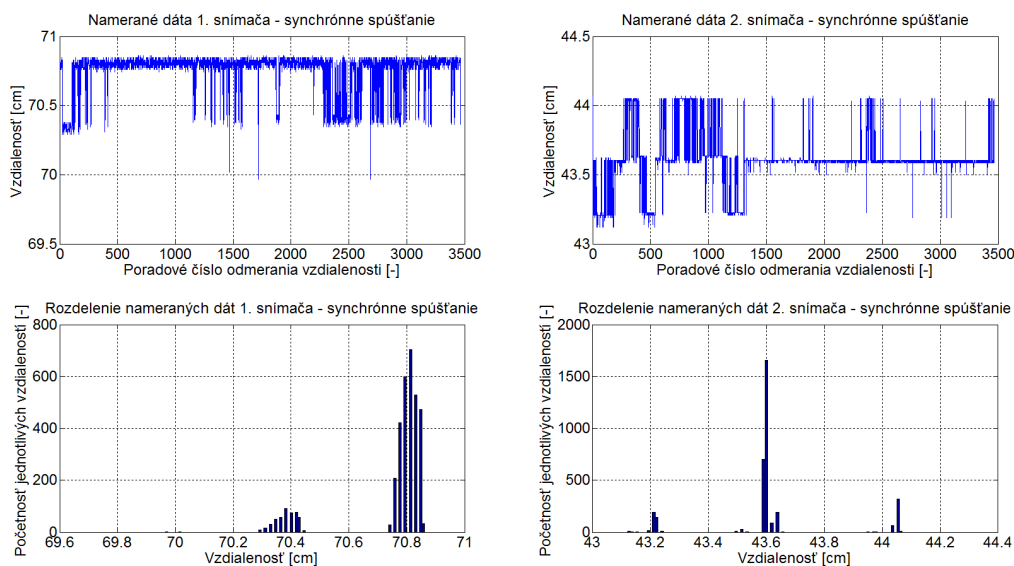
od ich priemernej hodnoty \bar{l}_i , avšak vo veľkej väčšine sa merania pohybovali v intervaloch do $\pm 1 \text{ mm}$ od ich priemernej hodnoty \bar{l}_i , okrem merania so sekvenčným spúšťaním, kde druhý snímač meral s najmenšou presnosťou. Presnosť merania potvrdzujú aj histogramy nameraných dát, ktoré obsahujú maximálne 2 intervaly dĺžok.

5.8.2. Snímanie vzdialenosti do 1 m

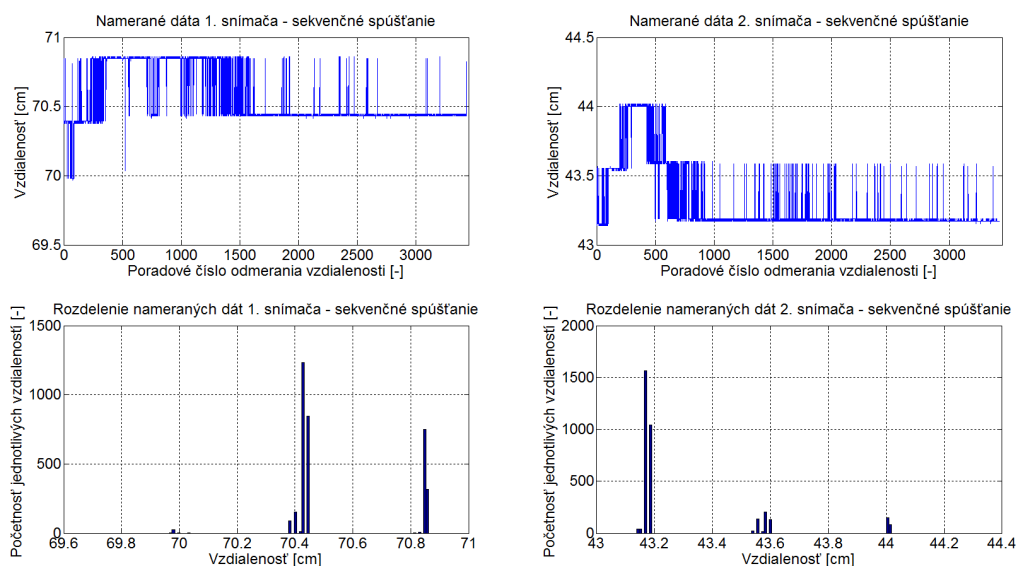
Pre potvrdenie platnosti výsledkov z predchádzajúceho merania, bola voľba umiestenia snímačov zvolená mimo uhlopriečku, vzhľadom k rohu miestnosti pre toto meranie. Jeden snímač bol vzdialený $l_1 = 70,5 \text{ cm}$ od steny, a druhý $l_2 = 43,5 \text{ cm}$ pri oboch spôsoboch spúšťania. Merania trvali takisto hodinu a pre získanie rovnako početných

5. MERANIE - ZISŤOVANIE VLASTNOSTÍ SNÍMAČOV

nameraných dát odmeraných vzdialeností sa frekvencia snímania f_s vzdialenosti zvolila rovnaká pre celý cyklus, a to jedenkrát za sekundu ($f_s = 1 \text{ Hz}$). Namerané dáta oboch meraní sú na obr. 5.45 pre synchronónne spúšťanie a na obr. 5.46 pre sekvenčné spúšťanie.



Obr. 5.45: Namerané dáta a ich rozdelenie pri použití synchronónneho spúšťania

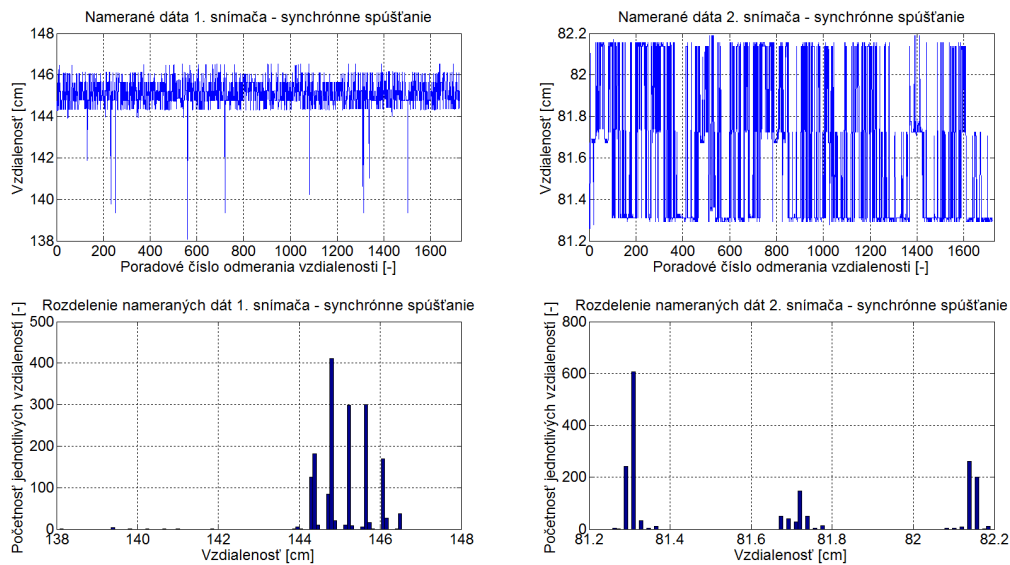


Obr. 5.46: Namerané dáta a ich rozdelenie pri použití sekvenčného spúšťania

Z nameraných dát je vidieť, že snímače opäť odmerali vždy svoju správnu vzdialenosť v rámci tolerancie $\pm 0,5 \text{ cm}$. Znovu nenastal ani jeden prípad, že by snímače zosnímali výrazne odlišnú vzdialenosť, prípadne vzdialenosť druhého senzoru. Merania považujeme opäť za presné, pretože sa všetky zmerané vzdialenosti pohybovali v zúžených intervaloch tolerancie I , a to $\pm 0,5 \text{ cm}$ od ich priemernej hodnoty \bar{l}_i . Presnosť merania potvrdzujú aj histogramy nameraných dát, ktoré obsahujú 2 až maximálne 3 intervaly dĺžok, avšak pri synchronónnom spúšťaní sú tieto intervaly o niečo širšie.

5.8.3. Overenie výsledkov

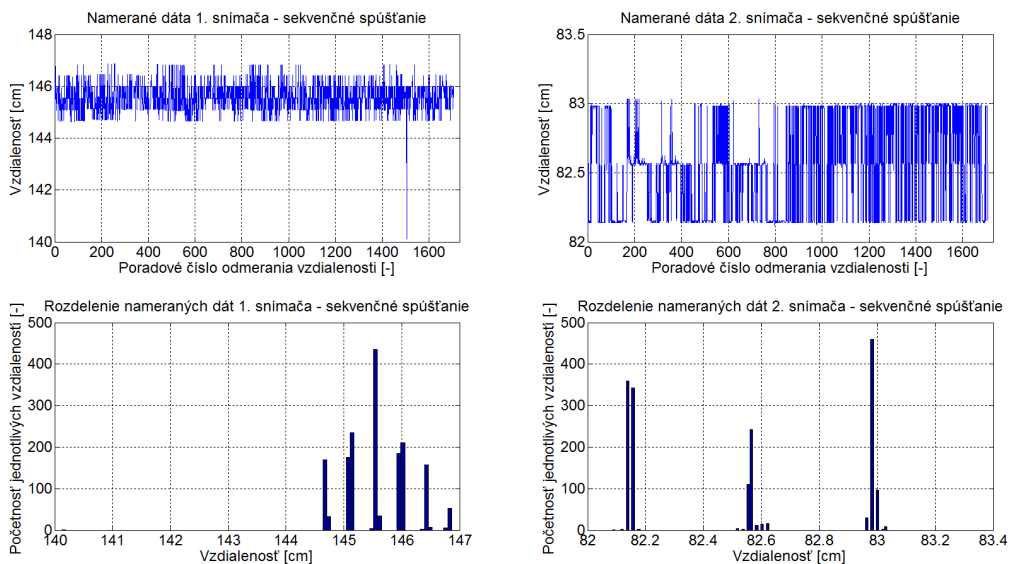
Kvôli overeniu výsledkov z predchádzajúcich meraní, sa vykonalo ešte jedno meranie v ešte väčšej vzdialenosti. Snímače pri tomto meraní umiestnené taktiež mimo uhlopriečku vzhľadom k rohu miestnosti. Snahou pri tomto meraní bolo merať pri rovnakých vzdialenostiach, ale omylom sa medzi meraniami pohlo so snímačmi, tak snímaná vzdialenosť pri sekvenčnom spúšťaní sa líši o 1 cm . Pri synchronnom spúšťaní bol prvý snímač vzdialený $l_1 = 145,5\text{ cm}$ od steny, a druhý snímač zas $l_2 = 82,5\text{ cm}$. Pri meraní so sekvenčným spúšťaním je vzdialenosť pre prvý snímač takisto $l_1 = 145,5\text{ cm}$, ale druhý snímač bol vzdialený $l_2 = 81,5\text{ cm}$. Obe merania trvali pol hodinu, takisto s rovnakou frekvenciou snímania f_s vzdialenosti pre celý merací cyklus pre obe merania, a to jedenkrát za sekundu ($f_s = 1\text{ Hz}$). Namerané dáta oboch meraní sú na obr. 5.47 pre synchronne spúšťanie a na obr. 5.48 pre sekvenčné spúšťanie.



Obr. 5.47: Namerané dáta a ich rozdelenie pri použití synchronného spúšťania

Z nameraných dát je vidieť, že snímače opäť odmerali svoje správne vzdialenosti, avšak pri prvom snímači sa občas vyskytla aj nepresná, nižšia hodnota z dôvodu, že sa v blízkosti nachádzal predmet, ktorý nemal byť detekovaný a nebolo možné ho odstrániť. Tento jav nie je považovaný za znehodnotenie merania, keďže to nemalo vplyv na cieľ týchto meraní. Opäť nenastal ani jeden prípad, že by snímače zosníмали vzdialenosť toho druhého senzoru, prípadne výrazne odlišnú vzdialenosť. Vzhľadom k presnosti merania vzdialeností, považujeme ich za presné, pretože sa odmerané vzdialenosti pohybovali v zúženom intervale tolerancie $\pm 0,5\text{ cm}$ od priemernej hodnoty \bar{l}_2 , pri druhom snímači s kratšou meranou vzdialenosťou. Dlhšiu vzdialenosť meral prvý snímač a odmerané vzdialenosti sa pohybovali v intervale tolerancie $\pm 1\text{ cm}$ od priemernej hodnoty \bar{l}_1 . Histogramy prvého snímača (snímal dlhšiu vzdialenosť) z oboch meraní obsahujú 6 intervalov dĺžok, ktoré spolu tvoria jeden široký interval s rozdelením veľmi blízkym Gaussovému rozdeleniu. Rozdelenie nameraných dát z druhého snímača obsahuje 3 dĺžkové intervaly pre oba spôsoby spúšťania, o šírke do 2 mm .

5. MERANIE - ZISŤOVANIE VLASTNOSTÍ SNÍMAČOV



Obr. 5.48: Namerané dáta a ich rozdelenie pri použití sekvenčného spúšťania

5.8.4. Zhodnotenie vzájomného rušenia snímačov

Vykonal sa spolu tri experimenty meraní rôznych vzdialeností, z ktorých každý súbor obsahoval oba spôsoby spúšťania snímačov. Snímané vzdialenosti sa líšili pri všetkých experimentoch, a zistilo sa, že snímače sa vzájomne nerušia (neovplyvňujú) pri meraní v rohu miestnosti. Teda nedošlo ani v jednom prípade, že by prvý snímač odmeral vzdialenosť druhého snímača, alebo naopak. Snímané vzdialenosti boli však iba do 1,5 m, z dôvodu že senzory merajú s menšou presnosťou pri väčších vzdialenostiach ako 2 m, a taktiež nebol dostatočný priestor a plocha pre vhodnejšie uloženie senzorov.

6. Porovnanie SRF05 s inými typmi snímačov

Táto kapitola porovnáva vlastnosti snímačov SRF05 s inými typmi ultrazvukových snímačov vzdialenosti od rôznych výrobcov. Porovnávané snímače boli od rôznych výrobcov, avšak veľká väčšina senzorov je len dvoch väčších výrobcov. Ide o britskú firmu *Devantech* a americkú firmu *MaxBotix*. Tieto firmy majú rôzne typy senzorov, pričom firma *MaxBotix* vyrába všetky ich typy senzorov aj v rôznych špecifikáciách s odlišnými vlastnosťami. Ďalej boli porovnávané snímače vyrábané firmami, ktoré nie sú zamerané na ultrazvukové senzory, ale vyrábajú nejaké typy. Datasheety ultrazvukových snímačov sú pomerne rozdielne, a vo veľa prípadoch sa neuvádzajú rovnaké vlastnosti/informácie pre rôzne senzory. Z tohoto dôvodu sa môže zdať že sú porovnávané rozdielne vlastnosti snímačov, avšak niektoré informácie o senzoroch sú nedostupné.

6.1. Porovnanie snímačov od firmy Devantech

Firma *Devantech* vyrába okrem iných typov snímačov aj použité SRF05. Niektoré základné typy senzorov tejto britskej firmy boli porovnávané, a to konkrétne, SRF02, SRF05 a SRF08, ktorých porovnanie základných vlastností je uvedené v tabuľke 6.1.

Snímač **SRF02** má 5 pinov, konkrétne $+V_{cc}$, GND , $Mode$ a ďalšie dva piny sú označené Rx/Tx pri použití Serial Bus zbernice, alebo pri použití I2C zbernice SDA/SCL). Pripojenie pinov $+V_{cc}$ a GND je rovnaké pri všetkých snímačoch (viď kapitola 4.1), preto sa to už pri ostatných snímačoch nebude spomínať. Pripojenie zvyšných pinov sa líši od voľby použitej zbernice a je uvedené v datasheete senzoru. Tento senzor ďalej obsahuje iba jeden ultrazvukový menič, ktorý využíva jak pre vysielanie ultrazvukových impulzov, tak aj pre ich následný príjem, z tohoto dôvodu jeho spodný merací rozsah je vyšší ako pri ostatných senzoroch. Nové ovládanie SRF02 umožňuje rozdeliť celý merací cyklus na dve časti, a to vyslať ultrazvukové impulzy bez následného prijímacieho cyklu, a vykonať prijímací cyklus bez predchádzajúceho vyslania ultrazvuku. SRF02 komunikuje cez Serial Bus rozhranie alebo cez I2C rozhranie. Pri Serial Bus používa klasický UART formát s TTL logikou pri 9600 Baudoch, 1 start bit, 2 stop bity bez kontrolných bitov a môže byť priamo pripojený sériovým portom k akémukoľvek mikrokontroleru. Použití jednej zbernice môže byť pripojených až 16 snímačov SRF02 [2].

Senzor **SRF08** obsahuje dva ultrazvukové meniče, jeden pre vysielanie ultrazvuku a druhý zas pre jeho prijímanie. SRF08 komunikuje cez I2C zbernicu (zobrazí sa ako 36 registrov), s predvolenou adresou 0xE0. Avšak užívateľ ju môže zmeniť na akúkoľvek z 16 adries (E0, E2, E4, E6, E8, EA, EC, EE, F0, F2, F4, F6, F8, FA, FC alebo FE), vďaka čomu je možné použiť na I2C zbernici až 16 snímačov, ktoré budú odpovedať na adresu 0 - General Broadcast address (adresu všeobecného vysielania). Avšak výstupy snímačov musia byť čítané individuálne z každej skutočnej adresy snímača. Ďalej SRF08 má 5 pinov, a to konkrétne $+V_{cc}$, GND , *Donotconnect* (nepripojovať), SDA a SCL . Pin "Donotconnect" má zostať nepripojený, je to vlastne spojenie procesora MCLR a používa sa iba raz na naprogramovanie ovládacieho čipu PIC16F872 po vyrobení a obsahuje vnútorný pull-up odpor. Piny SCL a SDA by mali byť vždy pripojené cez pull-up rezistory na napätie $+5 V$ na zbernici I2C. Je potrebný iba jeden pár rezistorov pre pripojenie

6. POROVNANIE SRF05 S INÝMI TYPMI SNÍMAČOV

<i>Výrobca: Devantech Limited</i>			
Typ snímača	SRF02	SRF05	SRF08
Merací rozsah [cm]	16-600	2-400	3-1100 - možnosť upraviť nastavením vnútorného časovača
Napájanie [V]	5	5	5
Spotreba prúdu [mA]	4(prevažne)	4(prevažne)	3 - Standby 11 - Meranie 40 - vysielanie ultrazvuku 275 (3 μ S) - príjem meracieho príkazu
Komunikácia	Serial bus (TTL) I2C Bus	Serial Bus (TTL)	I2C Bus
Jednotky merania	μ s, cm, in	μ s, cm, in	μ s, cm, in
Frekvencia ultrazvuku [kHz]:	40	40	40
Cena	cca \$26	£13,79 - \$18 cca \$1,30 z Číny	cca \$50

Tabuľka 6.1: Tabuľka porovnávaných senzorov firmy Devantech [2, 3, 4]

až 16 senzorov (nie je potreba pár rezistorov pre každý snímač). Pri použití SRF08 s I2C zbernicou je SRF08 vždy *slave* - nikdy nie *master*. Ďalej SRF08 dokáže pracovať v dvoch módoch, a to v meracom alebo ANN (Artificial Neural Network). ANN mód poskytuje dáta z viacerých meraní (viac prijatých ultrazvukov), čo umožňuje jednoduchšie vkládanie dát do neurónovej siete. Taktiež obsahuje funkciu "Kontrola dokončenia merania", ktorá umožňuje mikrokontroléru vykonávať iné úlohy ako čítanie dát zo snímača, pretože snímač neodpovie na požiadavky I2C zbernice pokiaľ sa meranie nedokončí. Ako bolo v porovnávacíj tabuľke 6.1 spomenuté, SRF08 môže mať upravený merací rozsah pomocou nastavenia vnútorného časovača, respektíve úpravou Range registra (registra vzdialenosti). Rozsah je možné upravovať od 43 mm po cca 11 m s krokom 43 mm. Podstata je v prepisovaní hodnoty registra vzdialenosti od 0 po 255. Prepočet rozsahu maximálnej vzdialenosti je $(hodnotaRangeregistra * 43) + 43$, teda ak je v Range registry hodnota 0, odpovedá to maximálnemu meraciemu rozsahu 43 mm. Dôvod na úpravu meracieho rozsahu je získavanie odmeranej vzdialenosti rýchlejšie. Takisto SRF08 môže mať upravený časový interval, ktorý je určený na príjem odrazeného ultrazvuku (predvolená hodnota 65 ms), teda vysielat' ultrazvukové impulzy častejšie. Tento časový interval sa upravuje pomocou nastavenia maximálneho zisku analógových úrovní v analogue gain register (register maximálneho zisku). Viac informácií o nastavovaní meracieho rozsahu a časového intervalu pre príjem odrazeného ultrazvuku je v datasheete snímača SRF08 [4].

Porovnaním snímačov od firmy *Devantech* je ťažké vybrať konkrétny snímač, pretože výber závisí hlavne na aplikácii snímača a použitej komunikačnej zbernici zariadenia. Preto, ak nie je potrebný moc veľký merací rozsah, šírka snímanej plochy a je potrebné

6.2. POROVNAIE SNÍMAČOV OD FIRMY MAXBOTIX

ušetriť na snímačoch, tak je jasnou voľbou SRF05. Avšak ak sú potrebné kvalitnejšie snímače, ktorým sa dajú upravovať niektoré vlastnosti a na ekonomickú stránku sa až tak nehladá, tak v tom prípade by boli vhodnejšie snímače SRF08.

6.2. Porovnaie snímačov od firmy MaxBotix

Spoločnosť *MaxBotix* vyrába širokú škálu typov ultrazvukových snímačov používaných buď to ako senzory vzdialenosti (diaľkomery) alebo senzory prítomnosti. V ponuke majú snímače jak pre indoorové prostredie, tak aj pre outdoorové. Pri outdoorovom prostredí sa snímače ešte delia podľa ich rozlišovacej schopnosti, 1 mm, 1,6 mm a 1 cm. Pri senzorech do indoor prostredia je rozlišovacia schopnosť 1 mm, 1 cm a 1 in. Z dôvodu, že všetky doteraz porovnávané snímače boli určené pre indoorové prostredie, tak aj v tomto prípade budú porovnávané iba senzory do indoorového prostredia. Jeden z najhlavnejších rozdielov medzi snímačmi do týchto dvoch prostredí je ten, že snímače pre outdoor majú špeciálne ochranné púzdro. Ďalším rozdielom je to, že vyžarovaný ultrazvuk je výrazne užší pri senzorech určených do outdoorového prostredie, čo je spôsobené spomenutým ochranným púzdrom. Pre vizuálne porovnanie snímačov do indoor a outdoor prostredia sú uvedené obrázky 6.1 a 6.2. Všetky senzory od tejto firmy sú vyrábané len s jedným ultrazvukovým meničom, ktorý slúži, jak pre vysielanie ultrazvuku tak aj pre príjem odrazeného ultrazvuku. Firma uvádza, že všetky ich senzory nie sú citlivé na farbu snímaného povrchu alebo iné vizuálne vplyvy.



Obr. 6.1: Ultrazvukový senzor série XL-MaxSonar-EZ do indoor prostredia



Obr. 6.2: Ultrazvukové senzory série XL-MaxSonar-WR/WRC do outdoor prostredia

Pre jednoduchosť a prehľadnosť nebudú porovnávané všetky senzory tejto firmy, ale vybrali sa iba 4 série vyrábaných senzorov, ktoré budú porovnávané s SRF05. Ide konkrétne o série snímačov *HRUSB-MaxSonar-EZ*, *XL-MaxSonar-AE (XL-MaxSonar-EZ)*, *I2CXL-MaxSonar-EZ* a *ParkSonar-EZ*, pričom každá séria senzorov obsahuje ešte nieko-

6. POROVNANIE SRF05 S INÝMI TYPMI SNÍMAČOV

lko modelov. Je potrebné ešte uviesť, že séria *XL-MaxSonar-EZ* má rovnaké vlastnosti ako séria *XL-MaxSonar-AE*, okrem výstupu snímačov, preto majú aj rovnaký datasheet. Z tohoto dôvodu sú porovnávané tieto dve série ako jedna. Základné vlastnosti týchto sérií sú uvedené v tabuľke 6.2, a sú vždy rovnaké pre všetky modely zo série, okrem oblasti detekcie, ktorá je pre každý model rozdielna. Potrebné je ešte poznamenať fakt, že uvedené meracie rozsahy sú maximálne, šírka aj dĺžka oblasti detekcie sa menia pre každý model zo série. Pre presnejšie informácie o oblastiach detekcie je potrebné sa pozrieť do príslušného datasheetu pre konkrétnu sériu.

<i>Výrobca: MaxBotix</i>				
Séria snímačov	HRUSB-MaxSonar-EZ	XL-MaxSonar-EZ (XL-MaxSonar-AE)	I2CXL-MaxSonar-EZ	ParkSonar-EZ
Počet modelov v sérií	5	14	5	7
Merací rozsah [cm]	30-500	20-765 20-1065 (vybrané modely)	20-765	15-645*
Napájanie [V]	5 (USB)	3,3-5,5	3-5,5	2,5-5,5
Spotreba prúdu [mA]	-	2,1-3,4(priemer) 50-100(špičkový)	4,4(priemer)	2-3(priemer)
Komunikácia	USB	Serial Bus (RS232,T/L logic, Analog U, Analog U obálka)	I2C	Serial Bus (T/F, RS232)
Jednotky merania	cm, in	cm, in	cm, in	cm, in*
Frekvencia ultrazvuku [kHz]:	42	42	42	42
Rozlíšenie	1 mm	1 cm	1 cm	1 in = 2,54 cm
Cena	cca \$50	cca \$45	cca \$40b	cca \$30
*Pozn: Uvedené hodnoty pre použitie ako diaľkomer, avšak primárne používané ako senzory priblíženia				

Tabuľka 6.2: Tabuľka porovnaných sérií senzorov vzdialenosti od MaxBotix [6, 9, 7, 8]

Senzory zo série **HRUSB-MaxSonar-EZ** sú špecifikované ako nízko nákladové diaľkomery s vysokou presnosťou a širokou škálou použitia. Aj keď sú špecifikované ako diaľkomery s frekvenciou snímania $f_s = 250 \text{ ms}$, sú však použiteľné taktiež ako senzory priblíženia. Táto séria sa vďaka USB rozhraniu jednoducho pripája napr. k počítaču priamo pomocou Micro-B UBS kábla. Okrem merania vzdialenosti v uvedenom rozsahu, senzory taktiež umožňujú detekciu predmetov v rozmedzí 1 mm až 5 m. V prípade, že by

6.2. POROVNAIE SNÍMAČOV OD FIRMY MAXBOTIX

sa nachádzal veľký predmet v blízkosti pod 30 cm, tieto snímače ho zdetekujú a vyhodnotia že je vzdialený 30 cm. Správna funkčnosť je zaručená v teplotnom intervale od $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+65\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ďalej ignorujú externé zdroje akustického hluku, majú vnútornú teplotnú kompenzáciu, a sú vhodné pre aplikácie s použitím viacerých snímačov. Výrobca uvádza, že sa vyskytuje skreslenie odrazeného ultrazvuku, čo spôsobuje nepresnosti do 5 mm, a to v meracom rozsahu od 30 cm až do 50 cm, čo je jedinou nevýhodou tejto série. Preto sa odporúča používať tieto senzory pre aplikácie s potrebným rozsahom začínajúcim nad 50 cm. Z tohoto dôvodu by neboli najvhodnejšie pre použité na robotov, a navyše z ekonomického hľadiska oproti SRF05 sú niekoľko násobne drahšie [6].

Pri sériách senzorov **XL-MaxSonar-EZ (XL-MaxSonar-AE)** je vhodné uviesť, že obsahujú real-time auto kompenzáciu teploty, napätia, vonkajšieho elektrického a akustického šumu. Rovnako ako pri predchádzajúcej sérii, aj tieto série sú nízko nákladové, a vyhodnocujú predmety umiestnené bližšie ako 20 cm že sú vzdialené 20 cm. Pre obe série platí, že formáty výstupných dát môžu byť reprezentované ako analógové napätie alebo digitálny signál (RS232). Avšak pri sérii XL-MaxSonar-EZ môže byť výstup reprezentovaný ako digitálny signál (TTL), a pri sérii XL-MaxSonar-AE je zase možnosť reprezentácie ako real-time analógovú obálku signálu. Senzory sú schopné merať vzdialenosť každých 100 ms, čo je rýchlejšie oproti predchádzajúcej sérii, avšak pomalšie ako SRF05. Z ekonomického hľadiska je aj táto séria snímačov podstatne drahšia v porovnaní s SRF05 [9].

Ako zo samostatného názvu série **I2CXL-MaxSonar-EZ** vyplýva, tieto senzory sú navrhnuté na komunikáciu cez I2C zbernicu, čo umožňuje pripojenie až 127 takýchto senzorov pomocou len dvoch káblov. Snímače sú vždy pripojené na I2C zbernicu ako *slave*, nikdy nie *master*. Ďalej sú vybavené automatickou kalibráciou pri zmene podmienok (napr. pri zmene napätia, výskyte elektrického alebo prípadne akustického šumu) v reálnom čase pre získane presných výsledkov. Aj táto séria je klasifikovaná ako nízko nákladové snímače, a dokáže detekovať predmety pod spodnou hranicou meracieho rozsahu a vyhodnocuje ich rovnakým spôsobom, aký bol opísaný pri predchádzajúcich dvoch sériách od firmy MaxBotix. Pre krátke vzdialenosti je možné snímať vzdialenosť až každých 25 ms ($f_s = 40\text{ Hz}$), avšak odporúčaná frekvencia je každých 100 ms ($f_s = 10\text{ Hz}$). Teplotný rozsah, pri ktorom snímače fungujú správne je $(0 - 65)^{\circ}\text{C}$. Aj napriek pomerne dobrým vlastnostiam, a tomu že sú predávané ako nízko nákladové, tak tieto snímače stále stoja dvojnásobne viac ako SRF05 ak berieme do úvahy cenu ktorú uvádza priamo výrobca [7].

Poslednou porovnávanou sériou snímačov bola séria **ParkSonar-EZ**, ktorá je vyrábaná ako senzory priblíženia, pre použitie ako parkovacie senzory. Pri aplikáciách s použitím viacerých kusov sa vyskytuje len minimálne až nulové vzájomné ovplyvnenie. Ako bolo v tabuľke uvedené, výstupné dáta sú reprezentované pomocou T/F formátu alebo RS232 formátu. Pri snímaní vzdialenosti senzory reagujú iba na stojace, alebo pomaly sa pohybujúce predmety s rýchlosťou do 5 m/s. Aj keď sú tieto senzory najlacnejšie z uvedených senzorov firmy MaxBotix, stále sú výrazne drahšie oproti SRF05. A vzhľadom k nízkemu rozlíšeniu by nebolo veľmi vhodné použiť tieto snímače pre aplikáciu na robota [8].

Aj napriek kvalitnému prevedeniu a dobrým vlastnostiam senzorov tejto americkej firmy je stále výhodnejšie použitie senzorov SRF05, vzhľadom k ich dostatočne kvalitným vlastnostiam v porovnaní s ich dostupnou cenou.

6.3. Porovnanie snímačov od rôznych firiem

Už názov hovorí, že táto podkapitola porovnáva snímač SRF05 s inými, ale veľmi podobnými snímačmi od rôznych výrobcov. Vlastnosti jednotlivých porovnávaných senzorov, ktoré sa podarilo vyhľadať v datasheetoch sú uvedené v tabuľke 6.3.

<i>Rôzny výrobcovia</i>			
Typ snímača Výrobca	Seeed Ultrasonic Sensor Seeed Studio	PING))) Ultrasonic Distance Sensor Parallax	URM06 - UART Ultrasonic DFRobot
Merací rozsah [cm]	3-400	2-300	20-1000
Napájanie [V]	5	5	6-12 5 je prijateľné, ale neodporúča sa
Spotreba prúdu [mA]	15(prevažne)	30(prevažne)	16 - menovitý 2[A] - špičkový
Komunikácia	Electronic brick (TTL, Arduino platforma)	Obojsmerná TTL logika cez 1 I/O pin	UART (TTL) (vyrábané aj pre RS485, Pulse, Analog)
Jednotky merania	μs, cm, in	μs, cm, in	mm
Frekvencia ultrazvuku [kHz]:	40	40	49,5
Rozlíšenie [cm]	1	-	1
Cena	cca \$15	cca \$30	cca \$60

Tabuľka 6.3: Tabuľka porovnávaných senzorov od rôznych výrobcov [5, 10, 14]

Ultrazvukový senzor firmy *Seeed Studios* nemá špeciálne označenie, obsahuje dva menšie s rovnakým využitím, ako napr. SRF05. Ďalej má tri piny, a to konkrétne $+V_{cc}$ a GND pre pripojenie napájania a uzemnenia. Posledný, tretí pin SIG slúži na privedenie spúšťacieho signálu, a takisto sa na tomto pine očakáva odozva na vyslaný ultrazvuk, z ktorej sa následne prepočíta odmeraná vzdialenosť. Teda pracuje na rovnakom princípe ako SRF05 v móde 2 (viď kapitola 4.1), až na jednu vlastnosť, že doba na prijatie odrazeného ultrazvuku je 38 ms, oproti SRF05, kde to je iba 30 ms. Je vyrábaný pre použitie s platformou *Arduino* [14].

Senzor firmy *Parallax* taktiež nemá špecifikované označenie, okrem uvedených vlastností je možné doplniť informáciu, že má takisto tri piny ako senzor firmy *Seeed Studio*, a teda sa aj rovnako pripájajú. Privádzaný spúšťací signál má v tomto prípade kratší čas, a to konkrétne minimálne 2 μs, ale bežne používaná dĺžka je 5 μs. Teda z toho vyplýva aj to, že je kratšia doba pre príjem odrazeného ultrazvuku, a to 115 μs – 18,5 ms. Ďalej je možné uviesť, že prevádzková teplota pri ktorej snímač funguje správne je (0 – 70) °C, ak sa prekročí teplota 70 °C, tak chyba merania je 11 – 12 %, avšak v datasheete je uvedený vzorec pre kompenzáciu tejto chyby pre potrebu merania pri vyšších teplotách [10].

6.3. POROVNANIE SNÍMAČOV OD RÔZNYCH FIRIEM

Snímač **URM06 - PULSE Ultrasonic** firmy *DFRobot* má štyri piny, a to $+V_{cc}$, GND , *trig* a *echo*. Piny *trig* a *echo* sa pripájajú na piny použitej riadiacej dosky rovnako ako pri SRF05. Pinom *trig* sa privádza na snímač spúšťací signál s minimálnou dĺžkou 50 μs . Tento signál na rozdiel od SRF05, má stále maximálnu hodnotu použitej logiky, a keď sa chce spustiť meranie, tak sa na určitú dobu hodnota nastaví na minimálnu hodnotu. Ak sa na pin privedie spúšťací signál s trvale nízkou hodnotou, tak snímač spustí meranie každých 100 *ms*. Na pine *echo* sa očakáva odozva na vyslaný ultrazvuk. Vyžarovaný signál má uhol 15 °, čo je približne rovnaký ako pri SRF05, avšak tento senzor má väčší merací rozsah. Prevádzková teplota sa pohybuje v intervale od $-10\text{ }^{\circ}C$ do $+70\text{ }^{\circ}C$. Tento typ snímačov sa vyrába aj pre komunikačné rozhranie *RS485*, *UART* alebo *Analog*. Pri rozhraní *RS485* je cena o \$10 vyššia [5].

7. Záver

Táto diplomová práca sa zaoberala najmä zisťovaním vlastností ultrazvukových snímačov SRF05. Pre akúkoľvek prácu s týmito snímačmi je potrebné si vždy najprv naštudovať princíp ako fungujú. Ďalej je potrebné si naštudovať ich technickú dokumentáciu, v ktorej nájdeme ako prepojiť senzory s doskou pre spracovanie signálu, aké majú požiadavky pre správnu funkčnosť, ako následne prepočítať výslednú odmeranú vzdialenosť z výstupného signálu snímačov. Pre spracovanie signálu bola zvolená komerčne vyrábaná doska *STM32 NUCLEO-F401RE*. Túto dosku som dostal zapožičanú spolu so snímačmi SRF05 do firmy *Bender Robotics s.r.o.*, pre ktorú budú výsledky práce rozhodujúce, pri rozhodovaní použitia týchto snímačov. Jedným z prvých väčších problémov pri realizácii práce, bola nedostatočná znalosť programovacieho jazyka C++, ktorého základy boli potrebné k napísaniu riadiaceho programu snímačov.

Po naučení jazyka C++ a následnom vytvorení riadiaceho programu pre snímače, bolo potreba navrhnuť rôzne druhy meraní, pomocou ktorých by bolo možné zistiť ako na senzory vplývajú rozličné zmeny podmienok, ako napríklad vplyv svetla, teploty, materiálu snímaného povrchu, a ako sa vzájomne snímače ovplyvňujú. Prvou sadou meraní bolo meranie rôznych vzdialeností, aby sa zistilo pri akých dĺžkach snímače merajú najpresnejšie, a kedy zas naopak najmenej presne. Zistilo sa, že keďže merací rozsah SRF05 je do 4 metrov, tak najlepšia presnosť merania je v prvej polovici tohoto rozsahu. Vzdialenosti z druhej polovice rozsahu snímače merajú takisto spoľahlivo, ale s väčšími nepresnosťami. Pri prvej sade meraní sa vyskytovala časová konštanta τ z doteraz neznámych dôvodov, a vzniklo podozrenie z rozdelenia nameraných dát, že by sa snímače mohli vzájomne ovplyvňovať, takže by nastal jav prepočutí snímačov. Nasledujúcou sadou meraní sa chcelo zistiť, či sa snímače vzájomne ovplyvňujú, resp. vylučovacou metódou vylúčiť jav prepočutí. Na rozdiel od prvej sady meraní, pri ktorej snímače boli spúšťané synchronne, pri druhej sade meraní sa snímače spúšťali sekvenčne. Týmto sa chcelo zistiť, či jav prepočutí ovplyvňuje namerané dáta, teda či vzniká viacej nameraných intervalov dĺžok, blízkych skutočnej vzdialenosti vplyvom prepočutí. Tento súbor vyvrátil toto podozrenie, pretože dĺžkové intervaly sa vyskytovali vždy takmer pri všetkých meraniach a určilo sa to ako základná vlastnosť snímačov.

Od začiatku práce bolo jasné, že teplo a svetlo budú vplývať na meranie, preto sa navrhli ďalšie dve sady meraní, pri ktorých sa menili podmienky prostredia merania pomocou, rôznych svetiel, meraním počas noci, IR ohrevom alebo vplyvom slnka. Nakoniec sa zistilo, že meranie vzdialenosti v prostredí s vyššou intenzitou svetla vplýva na odmeranie tak, že odmeraná vzdialenosť je väčšia, ako pri rovnakom meraní len v tme. Ďalej bolo zistené, že oteplenie snímaného povrchu zas skracuje odmeranú vzdialenosť, ako keď je snímaný povrch pri bežnej izbovej teplote. Aj keď tieto vplyvy sú rádovo v milimetroch, čo je vzhľadom k rozmerom robotov zanedbateľné. Nasledujúca piata sada meraní, mala cieľ zistiť vplyv materiálu snímaného povrchu na meranie, aby sa vedelo akým povrchom sa vyhnúť, resp. ako veľmi veriť výsledkom, pri daných snímaných povrchoch. Zistilo sa, že materiály s tvrdým povrchom v podstate nemajú zásadný vplyv na presnosť merania, na rozdiel od textilných materiálov, ktoré nie sú vhodné pre snímanie, pretože boli zosnímané ďalej ako reálne boli, rádovo v jednotkách centimetrov.

Jednou z najpodstatnejších vlastností, ktorú je potrebné vedieť pri používaní ultrazvukových snímačov, je znalosť oblasti detekcie snímača. Je to vlastnosť, ktorá určuje počet použitých senzorov pre danú aplikáciu. Snaha bola odmerať túto oblasť detekcie

čo najpresnejšie, aj keď jej zistenie je pomerne problematické. Boli vykonané merania v troch rôznych vzdialenostiach meracieho rozsahu, a zistilo sa, že tvar vyžarovaného ultrazvuku je približne kužeľovitý. Najširší vrcholový uhol bol zistený pri vzdialenosti 1,5 m. Vo vzdialenostiach 0,75 m a 3 m bol zistený vrcholový uhol o pár stupňov menší. Avšak všetky merania potvrdili, že veľkosť vrcholového uhla je menšia ako 15°. Poslednou sadou meraní bolo meranie vzdialeností v rohu miestnosti, a požiadavkou bolo zistiť, či nastáva jav, že snímač prijme odrazený ultrazvuk iného snímača, resp. odmeria nesprávnu vzdialenosť. Tento jav nenastal ani v jednom prípade, teda pri meraní v rohu nenastáva vzájomné ovplyvnenie - prepočutie.

Zo všetkých realizovaných meraní sa ale zistilo, že spôsob spúšťania merania ovplyvňuje výsledky. Pri meraniach so synchronným spúšťaním sa nepresnosti vyskytovali častejšie, teda je zrejmé, že to má vplyv na výsledky merania, resp. na jeho presnosť. Pre najpresnejšie výsledky by bolo vhodné ak by sa pri reálnej aplikácii spúšťali senzory sekvenčne, čo však nie je veľmi vhodné. Preto, pri použití snímačov SRF05 na robotovi, by bolo vhodné zvoliť niečo medzi synchronným a sekvenčným spúšťaním merania, a to tak že by použité senzory boli rozdelené do niekoľkých skupín, a tieto skupiny by sa spúšťali sekvenčne. Avšak snímače umiestnené v rovnakej skupine by sa nemali nachádzať vedľa seba.

Nakoniec sa ešte porovnali snímače SRF05 s niekoľkými inými druhmi ultrazvukových snímačov od rôznych výrobcov, čím sa splnili všetky body zadania diplomovej práce. Základné vlastnosti snímačov sa pri niektorých typoch líšia viac, a pri iných zase menej. Najčastejšie sa líšil merací rozsah a spôsob pripojenia, resp. komunikácie snímačov s riadiacim systémom. Avšak vzhľadom k nízkej cene snímačov SRF05 oproti ostatným typom, sú tieto snímače jasným favoritom pre aplikácie, kde nie je potrebná úplná presnosť merania a merací rozsah, ale skôr sa pozerá na ekonomické hľadisko. Pri aplikáciach, kde cena nehrá až tak rozhodujúcu rolu, ako parametre snímačov, by bolo vhodné vybrať kvalitnejšie snímače, ktorých by nebol potrebný taký počet ako SRF05, keďže majú celkom úzku zónu detekcie. Čo zároveň vedie na použitie viacerých snímačov, s čím je spojené aj konštrukčné hľadisko, teda potreba viac kabeláže, úchytovej na snímače a takisto zložitejší riadiaci program.

Literatúra

- [1] DOLINAY, J., *Programování mikropočítačů 6*[online]. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2013.[cit. 2017-05-06]. Dostupné z: www.utb.cz/file/42219_1_1/
- [2] DEVANTECH Co. Ltd., *SRF02 Ultrasonic range finder Technical Specification*[online].[cit. 2017-05-09]. Dostupné z: <https://www.robot-electronics.co.uk/htm/srf02tech.htm>
- [3] DEVANTECH Co. Ltd., *SRF05 - Ultra-Sonic Ranger Technical Specification*[online].[cit. 2017-05-09]. Dostupné z: <https://www.robot-electronics.co.uk/htm/srf05tech.htm>
- [4] DEVANTECH Co. Ltd., *SRF08 Ultra sonic range finder Technical Specification*[online].[cit. 2017-05-09]. Dostupné z: <https://www.robot-electronics.co.uk/htm/srf08tech.html>
- [5] DFRobot, *URM06-UART Ultrasonic Product Manual*[online].[cit. 2017-05-10]. Dostupné z: https://www.dfrobot.com/wiki/index.php/URM06-UART_Ultrasonic_SKU:SEN0150
- [6] MAXBOTIX Inc., *HRUSB-MaxSonar-EZ Series Datasheet*[online].[cit. 2017-05-09]. Dostupné z: http://maxbotix.com/documents/HRUSB-MaxSonar-EZ_Datasheet.pdf
- [7] MAXBOTIX Inc., *I2CXL-MaxSonar-EZ Series Datasheet*[online].[cit. 2017-05-09]. Dostupné z: http://maxbotix.com/documents/I2CXL-MaxSonar-EZ_Datasheet.pdf
- [8] MAXBOTIX Inc., *ParkSonar-EZ Series Datasheet*[online].[cit. 2017-05-09]. Dostupné z: http://maxbotix.com/documents/ParkSonar-EZ_Datasheet.pdf
- [9] MAXBOTIX Inc., *XL-MaxSonar-EZ Series Datasheet*[online].[cit. 2017-05-09]. Dostupné z: http://maxbotix.com/documents/XL-MaxSonar-EZ_Datasheet.pdf
- [10] PARALLAX Inc., *PING))) Ultrasonic Distance Sensor Documentation*[online].[cit. 2017-05-10]. Dostupné z: <https://www.parallax.com/sites/default/files/downloads/28015-PING-Documentation-v1.6.pdf>
- [11] PATRANABIS, D. *Sensors and Transducers* 2. ed. New Delhi: Prentice-Hall of India Pvt.Ltd., 2004. ISBN 81-203-2198-7.
- [12] PLATT, C. *Encyclopedia of Electronic Components Volume 3: Sensors*. San Francisco: Maker Media, 2016. ISBN 978-1-4493-3431-4.
- [13] RIPEL, T. *Návrh a realizace konstrukce kolového mobilního robotu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojího inženýrství, 2008. 35 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jiří Krejsa, Ph.D.
- [14] SEEDSTUDIO Co. Ltd., *Ultra Seeed Ultrasonic Sensor Datasheet*[online].[cit. 2017-05-10]. Dostupné z: <http://www.robotshop.com/media/files/pdf/datasheet-sen136b5b.pdf/>

LITERATÚRA

- [15] STMicroelectronics, *STM32 Nucleo-64 board Data brief*[online].[cit. 2017-05-05].
Dostupné z: http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/data_brief/c8/3c/30/f7/d6/08/4a/26/DM00105918.pdf/files/DM00105918.pdf/jcr:content/translations/en.DM00105918.pdf

Zoznam použitých skratiek a symbolov

Skratky

ADC	Analógovo-digitálny prevodník (anglicky Analog-to-Digital Converter)
IR	Infračervené (anglicky Infrared)
PWM	Pulzná šírková modulácia (anglicky Pulse-Width Modulation)
RTOS	Operačný systém bežiaci v reálnom čase (anglicky Real Time Operating System)
UV	Ultrafialové (anglicky Ultraviolet)
ČK	Časová konštanta

Symboly

α	Vrcholový uhol oblasti detekcie ultrazvuku	[°]
Δl	Rozdiel medzi priemernou odmeranou a skutočnou vzdialenosťou merania	[cm]
λ	Vlnová dĺžka	[nm]
\bar{l}_i	Aritmetický priemer merania vzdialenosti	[mm, cm, m, in]
σ_i^2	Rozptyl merania jednotlivých snímačov	[mm ² , cm ² , m ² , in ²]
τ	Časová konštanta snímača	[min, h]
f	Frekvencia	[Hz]
G	Konduktivita (vodivosť)	[S]
I	Interval tolerancie	[cm]
l	Vzdialenosť	[mm, cm, m, in]
l_i	Snímaná vzdialenosť snímačom i	[mm, cm, m, in]
P	Výkon	[W]
t_e	Časová dĺžka výstupného signálu zo senzoru	[μs]
t_s	Doba snímania	[s, min, h]
v_r	Rýchlosť robota	[km h ⁻¹]
v_z	Rýchlosť zvuku vo vzduchu	[m s ⁻¹]

LITERATÚRA

f_s	Frekvencia snímania	[Hz]
f_u	Frekvencia ultrazvuku	[Hz]
m	Hmotnosť	[kg]
U	Napätie	[V]

Elektronické prílohy na CD

- *Priečinok: pouzite_opisane_merania_v_DP* - obsahuje namerané dáta a m-fily pre ich spracovanie, dáta ktoré boli použité v diplomovej práci
(.txt súbory sú namerané dáta, .m sú skripty pre spracovanie dát v MATLABe)
- *Priečinok: nepouzite_merania* - obsahuje namerané dáta a príkladné m-fily pre ich spracovanie, dáta ktoré neboli použité v diplomovej práci
(.txt súbory sú namerané dáta, .m sú skripty pre spracovanie dát v MATLABe)
- *Priečinok: vzorove_riadiace_programy* - obsahuje vzorové riadiace programy pre použitie 1, 2 a 4 snímačov pre synchronne aj sekvenčné spúšťanie
(.txt súbory pre nahliadnutie do kódu, .bin programy priamo pre nahratie do čipu na doske SMT32-NUCLEO F401RE, .cpp programy pre úpravu kódu napr. cez Visual Studio alebo mbed platformu)
- *Priečinok: fotografie* - obsahuje fotografie zapojenia snímačov a meraní