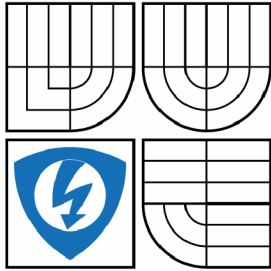




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

OPTICKÝ PROXIMITNÍ SKENER S MĚŘENÍM DOBY LETU

OPTICAL PROXIMITY SENSOR WITH TIME-OF-FLIGHT MEASURING PRINCIPLE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

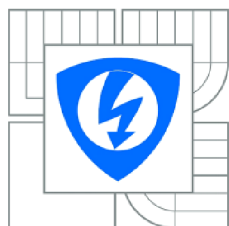
Bc. HANA MLATECOVÁ

VEDOUcí PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. LUDĚK ŽALUD, Ph.D.

BRNO 2011



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav automatizace a měřicí techniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Kybernetika, automatizace a měření

Studentka: Bc. Hana Mlatecová

ID: 72902

Ročník: 2

Akademický rok: 2010/2011

NÁZEV TÉMATU:

Optický proximitní skener s měřením doby letu

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Ověřte činnost a základní vlastnosti předloženého proximitního skeneru IFM PMD-3D. Navrhněte způsob zpracování jeho dat, vytvořte program pro vizualizaci dat snímače v reálném čase a jejich uložení pro pozdější zpracování. Pomocí tohoto programu proveďte analýzu parametrů tohoto snímače se zaměřením na parazitní.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

H.R. Everett, Sensors for Mobile Robots - Theory and Application, A K Peters, 1995, ISBN 1-56881-048-2

Termín zadání: 7.2.2011

Termín odevzdání: 23.5.2011

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

prof. Ing. Pavel Jura, CSc.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Tato práce se zabývá popisem proximitního optického 3D skeneru. Konkrétně se jedná o skener O3D201 od společnosti Ifm electronic, GmbH. V textu jsou popsány základní vlastnosti, měřicí princip a způsoby komunikace mezi PC a senzorem. Pro zpracování naměřených dat a jejich vizualizaci v reálném čase byla naprogramována uživatelská aplikace, která umožňuje data ukládat a usnadňuje tak, jejich následné zpracování. Práce se také zabývá analýzou parametrů snímače, zejména parazitních.

Klíčová slova

Senzor, 3D skener, měření vzdálenosti, TOF, PMD, vizualizace.

Abstract

3D optical proximity scanner is described in this thesis. The sensor is marked as O3D201 and is made by Ifm electronic, GmbH company. The text also describes the basic characteristics, measuring principle, PC connection method and communication. A program for communication between PC and sensor was created and named *O3D_Application*. This program provides functions for real-time data transfer and visualization. Measured data can be saved easily by this program. The thesis also contains an analysis of measured data and parasitic parameters of the sensor.

Keywords

Sensor, 3D scanner, measuring of distance, TOF, PMD, visualization.

Bibliografická citace:

MLATECOVÁ, H. *Optický proximní skener s měřením doby letu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 65s. Vedoucí diplomové práce byl doc. Ing. Luděk Žalud, Ph.D.

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Optický proximní skener s měřením doby letu jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušila autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhla nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědoma následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: **23. května 2011**

.....
podpis autora

Poděkování

Tímto děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Luďku Žaludovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc při vypracování mé diplomové práce a další cenné rady a připomínky.

Dále děkuji Ing. Františku Burianovi a Ing. Martinu Kopeckému za odborné rady a technickou podporu.

V Brně dne: **23. května 2011**

.....
podpis autora

Obsah

1	Úvod.....	8
2	Seznámení s 3D senzorem.....	9
2.1	Princip měření.....	10
2.2	Způsob komunikace.....	13
3	Parametry senzoru	15
3.1	Expozice a rychlost měření.....	15
3.2	Měřicí mód	16
3.3	Filtrace signálu	18
3.4	Technická specifikace.....	20
4	Porovnání senzorů	23
5	Knihovny	24
5.1	XML funkce	24
5.1.1	Funkce pro nastavení komunikace	24
5.1.2	Nastavení měřících parametrů.....	26
5.2	Knihovny v C#.....	28
5.2.1	ScannerPMD3d.cs	28
5.2.2	Scanner.cs.....	30
6	O3D_application	31
6.1	Uživatelské prostředí	32
6.2	Popis funkce programu	33
6.3	Naměřená data	34
7	Aplikace v prostředí MATLAB	36
7.1	Vytvořený program.....	36
7.2	Vizualizace uložených dat	37
8	Analýza měření.....	39
8.1	Přesnost měření vzdálenosti	39
8.2	Expoziční doba, rychlost měření	42
8.3	Materiály s různým úhlem natočení	43
8.4	Měřicí obrazec – kontrasty	48
8.5	Vliv světla na přesnost měření.....	54
8.6	Další zajímavosti (souměrný odraz, stín v pozadí).....	56
8.7	Ambigvita – nejednoznačnost rozsahu	59
9	Závěr.....	61

1 ÚVOD

V oboru automatizace, a nejen tam, je široká škála senzorů, které měří nejrůznější veličiny od teploty přes tlak, zrychlení, intenzitu osvětlení až po míru radiace a mnoho dalších. Omezíme-li se pouze na bezdotykové senzory vzdálenosti, stále nám zbývá mnoho typů senzorů, které lze rozdělit dle principu měření a použitého média (zvuková vlna, světelné záření). Mezi nejznámější patří například kapacitní, indukčnostní, ultrazvukové a optoelektronické snímače. Každý princip je něčím specifický a určuje základní vlastnosti snímače, jako je rozsah použitelnosti, pracovní prostředí, apod.

Tato práce se zabývá senzorem, jehož měřicím médiem je světelný paprsek a pro určení vzdálenosti využívá princip měření doby letu vyslaného paprsku. Konkrétně se jedná o optický skener O3D201 od společnosti Ifm electronic, GmbH (Obr. 2.1). Kromě jeho základních vlastností a měřicího principu jsou v textu popsány možnosti nastavení, způsob připojení k počítači a vzájemná komunikace [4]. Dozvíme se také, jakým způsobem a v jakém formátu je možné získat naměřená data. Dále je popsána vytvořená aplikace, která slouží ke komunikaci se senzorem, získávání měřených dat a jejich vizualizaci v reálném čase. Taktéž umožňuje ukládat data pro pozdější zpracování. Práce se dále zabývá analýzou naměřených dat a dokumentuje zjištěné výsledky z pohledu parazitních parametrů senzoru a nežádoucích vlivů okolního prostředí.

2 SEZNÁMENÍ S 3D SENZOREM

Společnost Ifm electronic, GmbH představila v roce 2009 novou technologii pro prostorové měření vzdálenosti [6]. Dosavadní optické senzory pro 3D měření využívaly rotaci zrcátka nebo byl použit 2D senzor a rotovalo se s celým senzorem – takto naměřená data mají mezi sebou časový odstup, protože naměří vždy jen jednu hodnotu, otočí zrcátkem/senzorem a pak teprve změří další data. U novějších typů senzorů je prodleva jistě malá - řádově v mikrosekundách – ale pokud bychom skenovali větší scénu, dostaneme velké množství dat (řádově tisíce hodnot) a mezi první a poslední hodnotou se tak časový odstup mnohonásobně navýší (řádově ms až s). Z toho vyplývá riziko tohoto přístupu a sice, že se scéna během měření změní. Proto si tento přístup můžeme dovolit pouze tam, kde se scéna dynamicky nemění nebo jen pomalu. Naproti tomu senzor O3D201 od společnosti ifm electronic využívá technologii PMD (Photonic-Mixer-Device), která umožňuje poskládat matici detektorů na 1/2“ čip [2]. Dokáže tak detekovat celou scénu najednou, což výrazně zrychluje měření a odstraňuje riziko předchozího přístupu. Můžeme tak snímat i rychle se měnící scény.

Tento senzor poskytuje data o intenzitě a vzdálenosti objektu pro každý pixel z obrazu scény. Rozlišení O3D201 je 64x50 obrazových bodů. Jeho dosah je minimálně 6,5 m (záleží na nastavených parametrech, viz dále) při zorném úhlu 30x40°. Další výhodou tohoto senzoru je umístění světelného zdroje, měřicího ústrojí, vyhodnocovací jednotky a komunikačního rozhraní v jednom pouzdře. Jedná se o inteligentní senzor v pravém slova smyslu. Přes to všechno je senzor finančně dostupný a vychází dokonce levněji než některé laserové 2D scannery (srovnání různých senzorů uvádí kapitola 4).



Obr. 2.1: Senzor O3D201

2.1 Princip měření

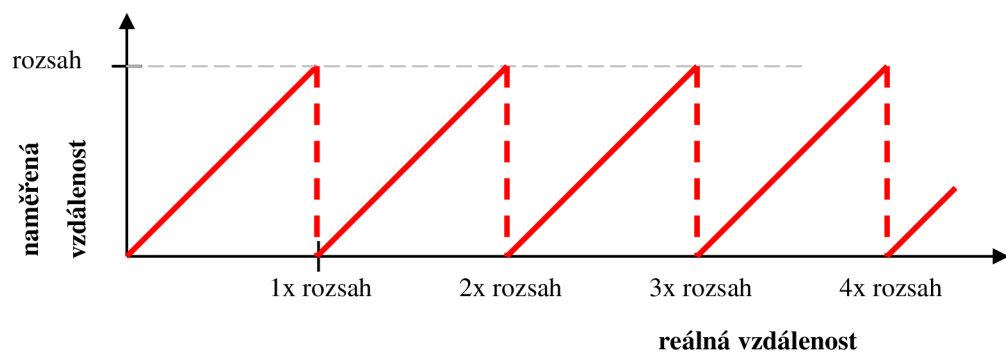
Jak již bylo zmíněno, senzor k měření vzdálenosti využívá princip TOF (Time-Of-Flight). To je měření doby letu signálu – v tomto případě optického paprsku. Měří se čas od vyslání paprsku až po jeho přijetí. Ze známé rychlosti šíření média je vypočtena vzdálenost, která je úměrná změřenému času. Vypočítanou hodnotu podělíme dvěma, protože paprsek překonal vzdálenost dvakrát. Matematicky je závislost popsána následujícím vzorcem:

$$s = \frac{t \cdot c}{2} \quad (2.1)$$

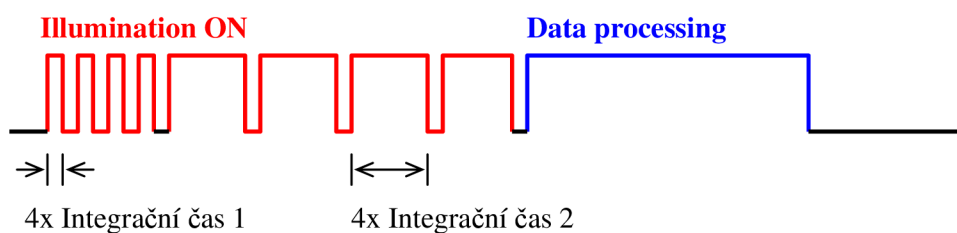
kde s ... vzdálenost,
 t ... změřený čas
 c ... rychlost šíření média.

Měřicí rozsah senzoru je omezen minimální a maximální detekovatelnou vzdáleností. Pokud je detekovaný objekt za maximálním rozsahem, stane se, že paprsek vyslaný v prvním cyklu měření je senzorem přijat až v dalším cyklu. Tím pádem je naměřen kratší čas a údaj o vzdálenosti je klamný. Např. pokud je rozsah senzoru 5 m, ale objekt se nachází ve vzdálenosti 8 m, pak senzor bude hlásit vzdálenost 3 m. Principiální znázornění této chyby ukazuje Obr. 2.2.

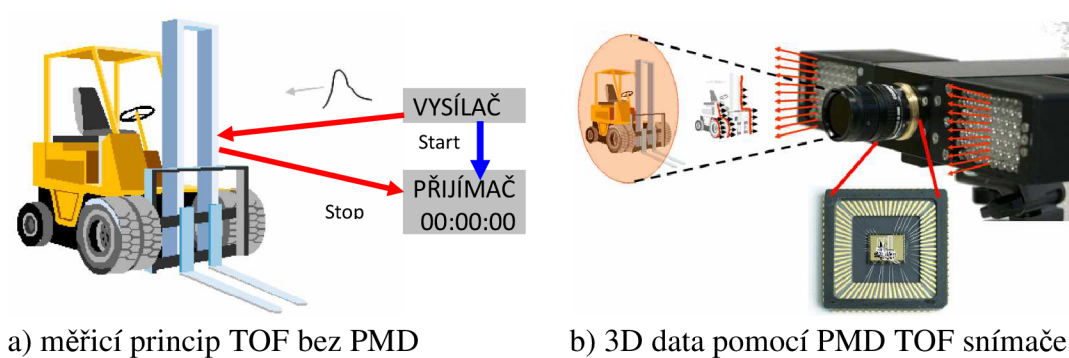
Tento problém je třeba si uvědomit a použít měřicí metodu, která problém eliminuje. U senzoru O3D201 je použito modulované světlo. Modulační frekvence, resp. vlnová délka modulovaného světla určuje maximální detekovatelnou vzdálenost. Zde je použita frekvence kolem 23 MHz, což odpovídá vlnové délce 13,4 m (dosah 6,5 m). V případě ještě většího požadovaného rozsahu se měření musí provést dvakrát s různou frekvencí – tzv. mód duální frekvence. Data jsou pak dopočítána z těchto dvou měření. U senzoru O3D se tak děje, pokud je zapnut mód dvojí integrace. Při první integraci se měří s jednou modulační frekvencí a při druhé integraci se použije jiná modulační frekvence. Průběh měření je znázorněn na Obr. 2.3. Je zřejmé, že měření se provádí pro každou integrační dobu čtyřikrát, proč tomu tak je bude vysvětleno v následujícím odstavci.



Obr. 2.2: Chyba detekované vzdálenosti [2]



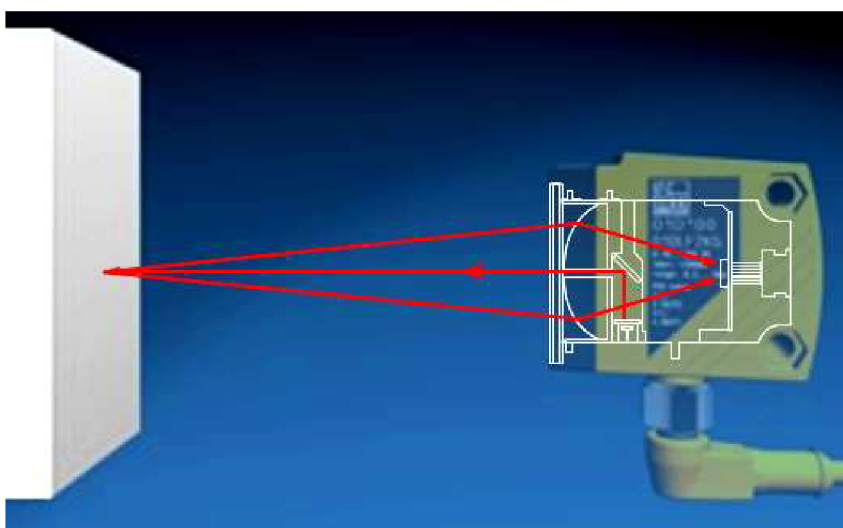
Obr. 2.3: Průběh měření pro dvojí integraci



a) měřicí princip TOF bez PMD

b) 3D data pomocí PMD TOF snímače

Obr. 2.4: TOF – rozdíl měřicích metod [7]



Obr. 2.5: Hardwarové uspořádání senzoru [5]

Senzor O3D používá měřicí technologii PMD, čímž může měřit celou scénu najednou bez časového odstupe mezi vzorky. Rozdíl mezi TOF s jedním přijímačem/vysílačem a PMD technologií naznačuje Obr. 2.4. Fyzické uspořádání takového senzoru ukazuje Obr. 2.5. Interní zdroj modulovaného infračerveného světla (LED) osvětlí scénu. Odražený paprsek pak přes optickou soustavu (čochky) dopadne na PMD matici ($\frac{1}{2}$ " čip). Mezi vyslaným a odraženým paprskem se provede korelace, z níž je pak vypočtena vzdálenost – viz Obr. 2.6. Máme signál o známé frekvenci f_{MOD}

a čtyři naměřené vzorky A_1 , A_2 , A_3 a A_4 , které jsou vzájemně posunuty o 90° . Fáze mezi maximem autokorelační funkce (ACF) a měřicím signálem A_4 je úměrná vzdálenosti, vypočítá se ze vztahu 2.2. Další parametr, který můžeme získat je intenzita přijatého signálu a . Ta je určena amplitudou ACF a lze ji vypočítat dle rovnice 2.3. Poslední informaci, kterou ACF poskytuje, je offset b reprezentující šedotónovou hodnotu v každém pixelu. Vzdálenost d se vypočítá obdobou vztahu 2.1, kdy místo času t dosadíme podíl fázového posuvu φ a jedné periody signálu (2π) násobenou modulační frekvencí – tedy vztahem 2.5. Maximální detekovatelná vzdálenost odpovídá stavu, kdy $\varphi = 2\pi$. Je tedy omezena modulační frekvencí f_{MOD} podle vztahu 2.6. Vlnová délka modulovaného signálu λ_{MOD} je podíl rychlosti šíření signálu a modulační frekvence.

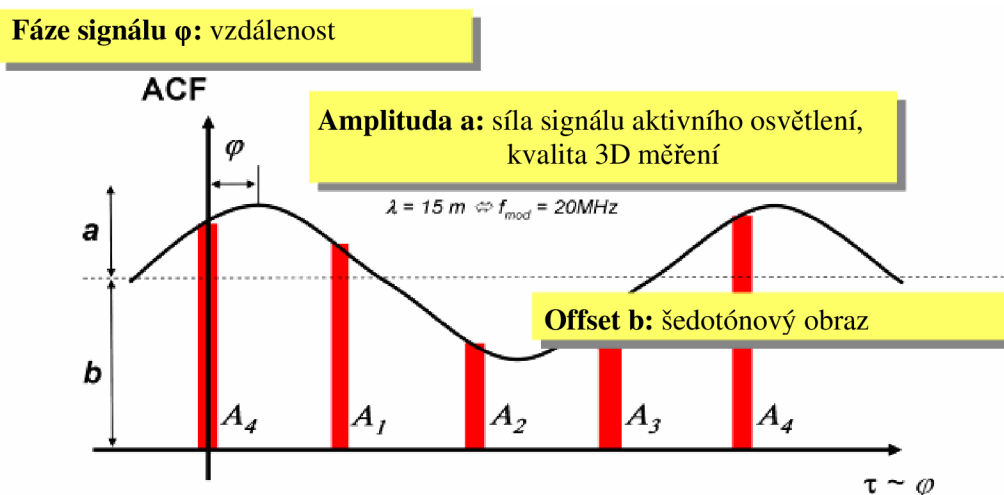
$$\varphi = \arctan\left(\frac{A_1 - A_3}{A_2 - A_4}\right) \quad (2.2)$$

$$a = \frac{\sqrt{(A_1 - A_3)^2 + (A_2 - A_4)^2}}{2} \quad (2.3)$$

$$b = \frac{A_1 + A_2 + A_3 + A_4}{4} \quad (2.4)$$

$$d = \frac{c \cdot \varphi}{4\pi \cdot f_{MOD}} \quad (2.5)$$

$$d_{MAX} = \frac{c}{2 \cdot f_{MOD}} = \frac{\lambda_{MOD}}{2} \quad (2.6)$$



Obr. 2.6: Autokorelační funkce (ACF) [7]

Pro každý obrazový bod dostáváme vzdálenost a intenzitu. Vše je měřeno ve sférické soustavě, přičemž jako střed soustavy se udává ohnisko optické soustavy senzoru. Do kartézských souřadnic jsou data přepočítána díky známé ohniskové vzdálenosti objektivu. Přepočty běží v senzoru automaticky při *Data processing*, tj. vždy se počítají všechny souřadnice (polární i kartézský souřadný systém). Senzor je schopen odeslat jen některé nebo jejich různou kombinaci – více viz kapitola 3.2.

Přesnost měření ovlivňuje několik faktorů. Jedním z nich je vzdálenost objektu, protože intenzita světla se vzdáleností kvadraticky klesá. To znamená, že objekty, které jsou blíže, dokáže senzor detekovat s větší přesností. Dalším zneprůhledňujícím parametrem je pohltivost, reflektivita, případně průsvitnost tělesa. Podle [2] jsou tmavé objekty s odrazivostí 5 % detekovány bezpečně do vzdálenosti 4 m, zatímco objekty s vysokou reflektivitou mohou být detekovány až na vzdálenost 150 m (uvažováno bez omezení rozsahem snímače). K rušivým vlivům se ještě přidává ambientní světlo. Dohromady mají tyto rušící vlivy za následek velký dynamický rozsah scény. Výrobce se samozřejmě snažil vliv těchto rušení minimalizovat.

[7] uvádí závislost statické nepřesnosti měření jako funkci síly šumu signálu a systému dle rovnice:

$$dR = \frac{1}{\sqrt{N_{PHASE}}} \cdot \frac{1}{k_{TOT} \cdot \frac{S}{N}} \cdot \frac{\lambda_{MOD}}{\pi \cdot \sqrt{8}} \quad (2.7).$$

Kde k_{TOT} je modulační kontrast, S počet elektronů ze světelného zdroje, N je ekvivalentní počet elektronů šumu (zahrnuje šum světelného zdroje, šum okolního světla, teplotní a systémový šum a šum způsobený napájením), N_{PHASE} je počet provedených měření, λ_{MOD} je vlnová délka modulovaného světla.

2.2 Způsob komunikace

Komunikace se senzorem je možná několika způsoby. Nastavovat měřicí parametry a získávat měřená data můžeme pomocí ethernetu nebo využitím digitálních vstupů/výstupů, příp. z analogového výstupu. Omezené funkce poskytuje i možnost ovládání senzoru přes tlačítka umístěná pod čtyř-segmentovým displejem. Další část textu se bude zabývat pouze komunikací pomocí ethernetu.

Pro komunikaci se senzorem musí být vytvořen klient XML-RPC¹. Senzor má v sobě zabudován server s defaultně nastaveným portem 8080 pro příjem (číslo portu je možné změnit). Komunikace s O3D je založena na dvou TCP/IP² portech. První je konfigurační, slouží pro nastavení parametrů senzoru a využívá protokol XML-RPC server. Druhý port slouží k přenosu obrazových dat jako TCP/IP bytestream socket. Každý datový balík je před odesláním dotázán jedním bytem přes tento socket. Posílaná

¹ XML-RPC (eXtensible Markup Language – Remote Procedure Call) je protokol využívající vzdáleného volání procedur.

² TCP/IP (Transmission Control Protocol/Internet Protocol) je sada protokolů pro komunikaci v počítačové síti.

data obsahují hlavičku a vlastní data. V hlavičce jsou uvedeny měřicí parametry, které byly nastaveny při měření dat a případná chybová hlášení.

Pokud bude komunikace mezi klientem a senzorem O3D přerušena a klient se pokusí znovu připojit, neuspěje, protože port zůstává otevřený. Tento problém řeší vlastní funkce senzoru (*Heartbeat*), která kontroluje připojení každých 10 sekund a pokud senzor nereaguje, port uzavře. XML-RPC port může zůstat uzavřen, pokud nechceme měnit konfiguraci snímače. Datový port je taktéž kontrolován každých 10 sekund, pokud je zjištěna chyba, jsou uzavřeny všechny porty, resetuje se server a teprve potom se může klient znovu připojit. Pokud svítí na displeji nápis „OnLi“ znamená to, že se nemůže připojit další klient.

Vlastní XML-RPC funkce jsou popsány v samostatné části – kapitola 5.1.

Senzor je vybaven ochranou proti přehřátí. Pokud teplota dosáhne kritické hodnoty, senzor vypne osvětlení potřebné pro měření. Na příchozí příkazy reaguje, ale posílá stará data. Toto je indikováno v hlavičce datového souboru (hodnota *valid image* bude v tomto případě nula).

3 PARAMETRY SENZORU

Senzor se může nacházet v různém prostředí, být vystaven různým vlivům, používán pro různé aplikace. Záleží na tom, jestli je přítomno rušivé světlo z jiného zdroje než ze senzoru, jaké vlastnosti mají detekované objekty. Zda potřebujeme data opravdu přesná, například pro identifikaci objektu nebo stačí méně přesná – pro získání informace o volném místě kolem senzoru apod. Proto je senzor vybaven několika funkcemi, které umožňují uživateli ovlivnit přesnost a kvalitu získaných dat [2]. Stručným popisem těchto funkcí se bude zabývat tato kapitola.

Mezi nejdůležitější patří měřicí mód, typ integrace, expoziční časy a nastavení filtrů. Dále bude v této kapitole popsána technická specifikace senzoru, jeho nároky na zdroj a další vlastnosti.

3.1 Expozice a rychlost měření

V okolním prostředí se může nacházet zdroj rušivého světla, objekty mohou méně nebo více reflektovat měřicí paprsek, detekovaná scéna má menší či větší hloubku (rozdíl mezi minimální a maximální vzdáleností). Proto je možné nastavit pro různé podmínky různé měřicí parametry. Pro minimalizaci výše uvedených problému je možné na senzoru nastavit jednoduchou nebo dvojitou integraci/expozici a k tomu příslušné integrační časy (též označované jako expoziční doba). Integrační časy můžeme nastavit dva, pro přehlednost si je označme jako INT1 a INT2. V případě, že je zvolena jednoduchá integrace, uloží se vyšší expoziční doba do INT1, v INT2 pak zůstane kratší expoziční doba. Měří se s expoziční dobou INT1. Je-li nastavena dvojitá integrace INT1 je menší než INT2. Průběh měření s dvojitou integrací je znázorněn na Obr. 2.3. První červeně označený průběh je první expozice s integračním časem 1, druhá, červeně označená část, je druhá expozice (integrační čas 2), v čase označeném modře se provádí výpočet (Data processing), který trvá přibližně 30 ms dle [2]. Z obrázku je patrné, že při jedné expozici se provedou čtyři měření pro každou expozici, to se děje kvůli korelační funkci, která byla vysvětlena výše.

Nastavíme-li krátkou expozici, nedetekujeme vzdálené předměty. Naopak pokud nastavíme dlouhou expozici pro detekci úzkých vzdálených objektů, objekty, které jsou nejbližší budou přesvícené (přesaturované). Taková data jsou nepoužitelná. Proto pro scény s větší hloubkou je vhodné použít dvojitou integraci se dvěma expozičními dobami. Pokud se pokusíme uložit integrační doby obráceně ($INT2 < INT1$) senzor si je porovná a uloží je správně – tedy tak, aby byla splněna podmínka $INT2 > INT1$. Měření se provádí nejprve s krátkou expoziční dobou a následně s dlouhou expoziční dobou. Správná hodnota dat je pak vybrána pro každý pixel. U výběru se zohledňuje to, aby obrazové body nebyly přesvícené ani podexponované. Správné nastavení expozičních dob je individuální pro různé scény a nejčastěji se stanovuje experimentálně. Doporučený poměr mezi krátkou a dlouhou integrací je 10 podle [2] a měl by být

dostatečný pro většinu scén. Při špatném nastavení, například pokud bude první integrace příliš krátká, budou všechny objekty podexponované a vzaly by se hodnoty naměřené druhou integrací. Tato data budou zřejmě k ničemu, protože objekty umístěné blízko senzoru budou pravděpodobně přeexponované. Naopak bude-li první expoziční doba delší a druhá integrační doba příliš krátká, většina hodnot bude vybrána z první integrace, to znamená, že hodnoty z druhé integrace nám měření nijak nezpřesní.

Pokud je hlavním požadavkem rychlost a scéna není hloubkově náročná (odstup blízkých a vzdálených objektů není velký), pak dvojí integrace nejspíš nebude nutná. Musíme ale také přihlédnout k problému z kapitoly 2.1 o nejednoznačnosti rozsahu. Máme-li scénu, ve které může dojít k chybě způsobené zmíněným způsobem, měli bychom použít dvojí integraci. Expoziční dobu INT1 zvolíme co nejmenší a INT2 dostačující pro danou scénu. Expoziční doba lze nastavit od 1 μs do 5000 μs . Pro orientační výpočet rychlosti měření nám stačí znát obě expoziční doby. Z časového průběhu na Obr. 2.3 víme, že expozice se provede čtyřikrát, takže celkový čas potřebný k naměření dat je 4x integrační čas (plus 4x druhý integrační čas) a prodleva na zpracování dat vyhodnocovací jednotkou (přibližně 30 ms). Máme-li nastaveny integrační časy například INT1 = 125 μs a INT2 = 2000 μs , čas jednoho měření bude zhruba 38,5 ms.

3.2 Měřicí mód

Měřicí mód udává, jakým způsobem budou data ze senzoru získávána. V podstatě má senzor O3D dva měřicí módy – *freerunning* mód a *trigger* mód. *Freerunning* mód znamená, že data budou získávána průběžně (kontinuálně). Periodu opakování pak udává zvolený způsob měření (jednoduchá/dvojí integrace, průměrování). Tento čas je nazýván *evaluationtime* a je zaznamenán v hlavičce datového souboru. Celková snímkovácí frekvence (*framerate*) je dána vztahem:

$$framerate = \frac{1}{ifmtime + evaluationtime} \quad (3.1).$$

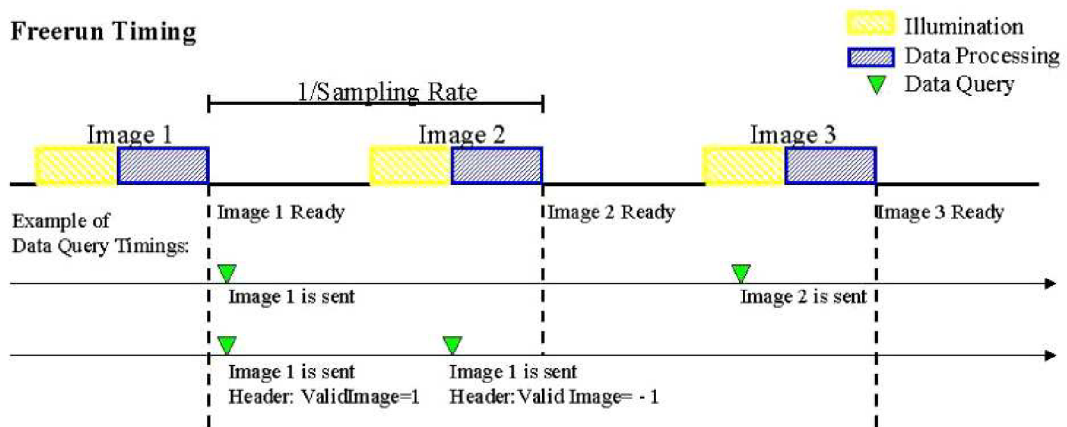
Kde *ifmtime* je interní čas, který lze nastavit. Například, pokud potřebujeme pro aplikaci přesně definovanou prodlevu a měření je rychlejší. Se změnou integračních dob se změní i *framerate* – snímkovácí rychlost, pokud neupravíme *ifmtime*.

Druhým měřicím módem je *trigger* mód. Ten určuje, že měření se spustí pouze při spouštěcím signálu. Spouštěcí signál může být softwarový – XML příkaz, nebo hardwarový – náběžná/sestupná hrana signálu přivedeného na příslušný pin (viz Tabulka 2).

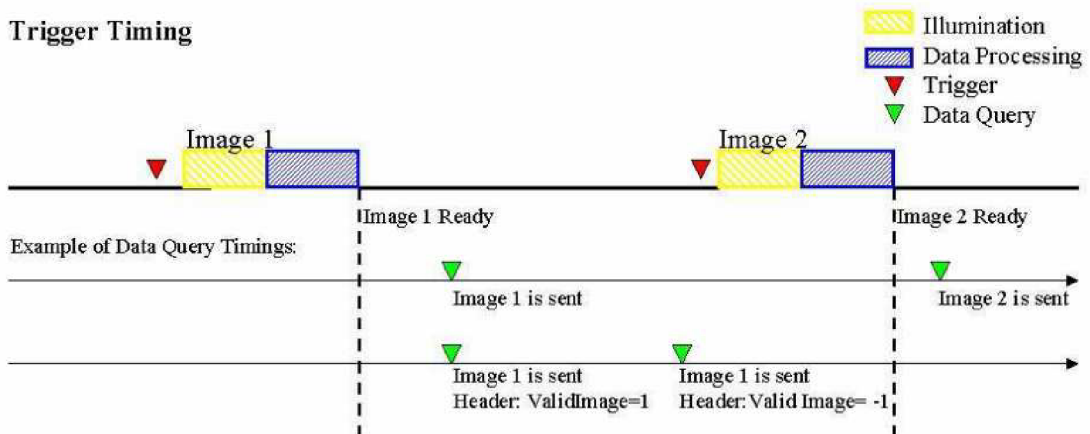
Pokud je zapnuta funkce průměrování (*AverageDetermination*), výsledná data jsou dána průměrem n po sobě jdoucích měření, kde n je nastavitelný parametr.

Pro oba módy (*freerunning/trigger* mód) jsou žádosti/příkazy o zaslání změřených dat stejné. Je-li příkaz napsán malými písmeny (např. xyz), senzor pošle poslední

naměřená data, přičemž data všech souřadnic jsou ze stejné expozice. Jestliže interval mezi dvěma žádostmi je dlouhý, všechna data naměřená mezi tím budou ztracena. Je-li naopak prodleva příliš malá, obdržíme stejná data dvakrát. Poznáme to porovnáním parametru *ValidImage* v hlavičce datového souboru, která se změní z hodnoty 1 na hodnotu -1. Příkaz pro zaslání dat (žádost) můžeme napsat i za použití velkých písmen. Přičemž velké písmeno znamená, že přichází data musí být nová (nebyla dosud poslána). Následují-li za velkým písmenem malá – např. Xyz, znamená to, že souřadnice y a z jsou ze stejné expozice jako x. Napíšeme-li celý příkaz kapitálkami (XYZ), dostaneme hodnoty z po sobě jdoucích snímků (X – jeden snímek, Y – druhý snímek, Z – třetí snímek).



Obr. 3.1: Freerunning mód, časový průběh [2]



Obr. 3.2: Trigger mód, časový průběh [2]

Na Obr. 3.1 je znázorněn možný časový průběh pro *freerunnig* mód a na Obr. 3.2 analogicky pro *trigger* mód. Žlutá barva označuje vlastní měření (*Illumination*), modrá označuje čas pro zpracování naměřených dat (*Data Processing*), zelené terčičky označují příchod žádosti/příkazu (*Data Query*) a červené terčičky označují příchod spouštěcího signálu (pouze u *trigger* módu). Na příkladu v posledním řádku je vidět, že hodnota parametru *ValidImage* v hlavičce přijatých dat se změnila z 1 na -1, protože v době druhého dotazu ještě nebyla k dispozici data nově naměřená.

3.3 Filtrace signálu

Dle [2] lze filtry obecně rozdělit do dvou skupin. První skupinu tvoří filtry pracující v časové doméně. To znamená, že z časové posloupnosti několika snímků vyhodnocují výstupní obraz. Do této skupiny patří například průměrování několika obrazů dohromady. Je zřejmé, že výsledek je závislý na předchozích hodnotách. Druhou skupinu tvoří filtry pracující pouze s jedním obrazem, pracují v tzv. prostorové doméně. Jedná se o úpravu jednotlivých bodů obrazu na základě okolí bodu (např. konvoluce obrazu).

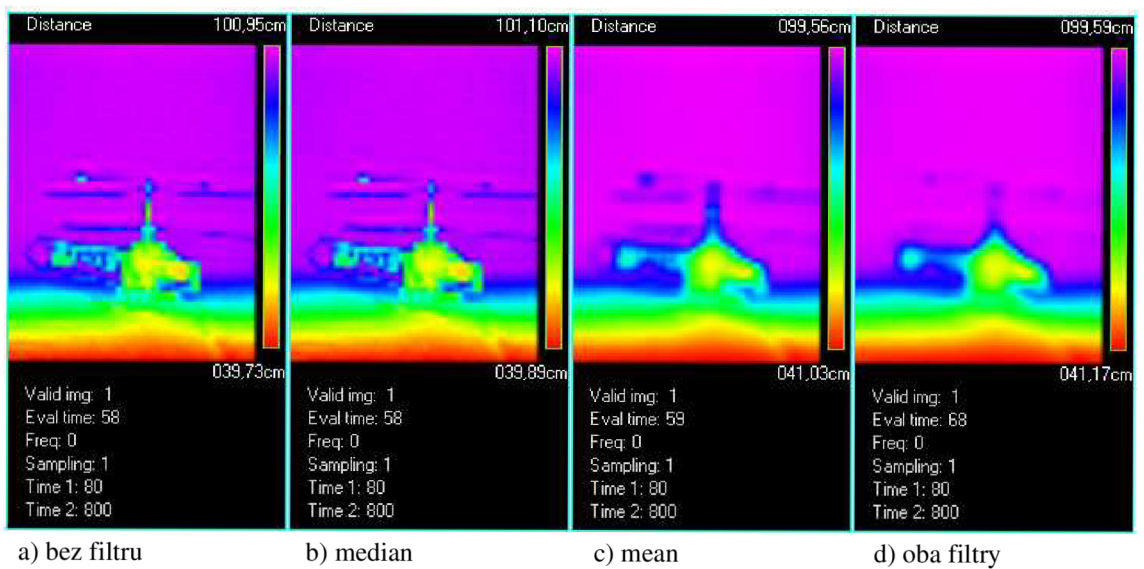
Senzor O3D201 umožňuje průměrování obrazů – *AverageDetermination*. Průměrování se provádí pro n měření, kde n je nastavitelný parametr. V prostorové oblasti nabízí senzor dva filtry. Prvním je *median* filtr, ten odstraní šum v obraze, ale celkem dobře zachovává hrany. Druhým je *mean* filtr, který už hrany rozmazává, na některých objektech s úzkým profilem může dojít až k vymizení hrany z obrazu. Filtry se dají nastavit libovolně – nezávisle na sobě – proto může nastat situace, kdy není zapnut žádný filtr nebo jsou zapnuty oba nebo jen jeden z nich.

Při použití filtru dochází k zneřádnění dat, proto je dobré se zamyslet, jestli filtry používat a pokud ano, tak proč. Pokud potřebujeme měřit přesnou vzdálenost drobných předmětů – jde nám o přímá data, filtr nepoužijeme. Využíváme-li senzor například jako navigaci pro obsluhu vysokozdvížného vozíku (umístění balíku do vrchních polic skladu), stačí nám hodnoty přibližné, resp. vizualizace dat. Pro tuto aplikaci bychom použili mediánový nebo mean filtr. Průměrování dat není vhodné pro rychlé dynamické scény.

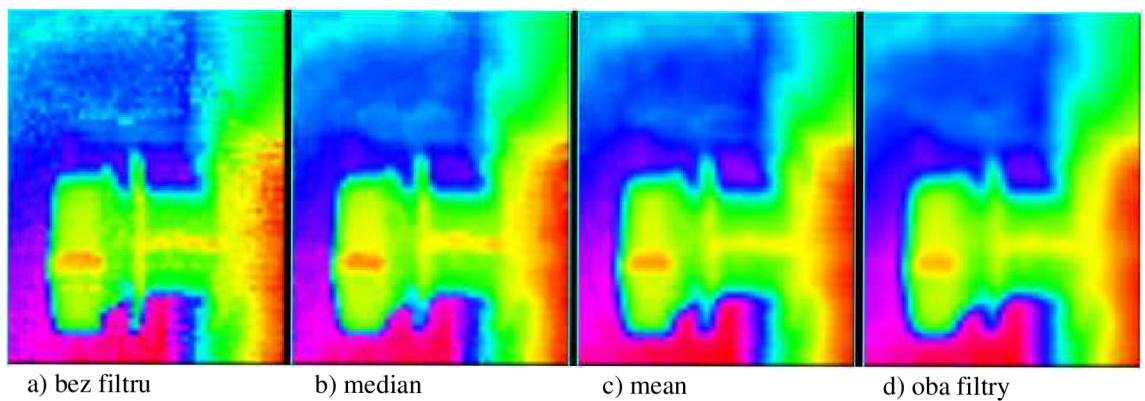
Vliv filtrů na výsledky měření dokumentuje experiment, kdy byla změřena stejná scéna (viz fotografie helikoptéry na Obr. 3.3) s různě nastavenými filtry. Výsledky ukazuje Obr. 3.4. Mediánový filtr odstraní šum v obraze, což má za následek vyhlazení obrazu, ale zachová hrany, mean filtr odstraní šum, zneřádní tenké linie, ale způsobí rozmazání hran. Při použití obou filtrů jsou tenké hrany a objekty eliminovány téměř úplně, zůstává jen silueta objemnějších částí. Z parametrů zobrazených pod vizualizací vyčteme, že doba zpracování se při použití obou filtrů (parametr *Eval Time*) prodlouží zhruba o 10 ms. Efekt odstranění šumu je patrnější z Obr. 3.5, kde je zachycena špulka cínu na stole pro různé nastavení filtrů.



Obr. 3.3: Fotografie helikoptéry



Obr. 3.4: Srovnání filtrů



Obr. 3.5: Špulka cínu na stole (senzor byl otočeno o -90)

3.4 Technická specifikace

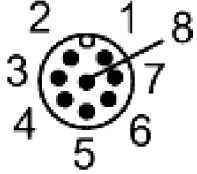
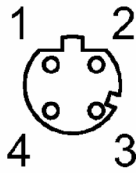
Procesní připojení senzoru 03D201 je realizováno 8-pinovým konektorem. Kromě napájecího vodiče (24 V) a zemnicího vodiče (0 V) je zde pin spouštěcího signálu (trigger), dva vstupní piny (IN1, IN2) a dva výstupní (OUT1, OUT2). Označení a význam pinů uvádí Tabulka 3.1. Stejně tak pro parametrizační připojení ethernetové komunikace.

Digitální vstupy a výstupy jsou brány jako logická nula pokud je na nich nulové napětí. Jako logická jednička jsou brány digitální vstupy při hodnotách 24 V/3 mA, digitální výstup při napětí 24 V a proudu max. 100 mA. Analogový výstup může být nastaven jako proudový nebo napěťový. Pro proudový výstup je rozsah 4 až 20 mA při max. napětí 10 V (max. zátěž 300 Ω). Pokud je výstup nastaven jako napěťový jeho rozsah se pohybuje od 0 do 10 V pro max. proud 10 mA (min. zátěž 10 kΩ). Piny jsou řízeny 8-bitovými registry. Pokud chceme použít hardwarový přístup, musí být senzor v režimu *framegrabbermode*, jinak jsou registry přepisovány periodicky softwarově (např. pro *freerunning* mód). Registry obsahují data pro čtení i zápis.

Senzor je vybaven ochranou proti přepólování. Tabulka 3.2 uvádí vybrané důležité parametry. Rozměry obrazu, resp. jednotlivých pixelů v obraze jsou závislé na vzdálenosti. Přepočítání velikosti obrazu pro různé vzdálenosti ukazuje Tabulka 3.3. Pro spolehlivou detekci objektu musí být tento zachycen alespoň na dvou pixelech. Závislost měřitelné vzdálenosti na integrační době prezentuje Tabulka 3.4.

Více technických parametrů je možné nalézt na stránkách výrobce [4].

Tabulka 3.1: Zapojení kontaktů

procesní připojení	pin	význam	parametrizační připojení	pin	význam
	1	U+ (bílá)		1	TD+
	2	Spouštěcí vstup		2	RD+
	3	0 V (zelená)		3	TD-
	4	OUT 1 / Analogový výstup		4	RD-
	5	Ready			
	6	OUT 2			
	7	IN 1 /Spínací vstup 1			
	8	IN 2 /Spínací vstup 2			

Tabulka 3.2: Technické parametry senzoru O3D201

Druh senzoru	Čip PMD 3D
Standardní dosah	6,5 m
Zorný úhel	40 x 30 °
Rozlišení čipu	64 x 50 obrazových bodů
Max. nastavitelná rychlost měření	20 Hz
Displej	4-místný 10-segmentový 4 x LED žlutá 4 x LED zelená
Provozní napětí [V]	24 DC ± 10 %
Příkon [W]	16
Proudový odběr [mA]	< 2500 ³
Proudová zatížitelnost pro každý výstup [mA]	100
Vnitřní osvětlení	Infračervené LED (850nm), bezpečnostní třída I.
Okolní teplota [°C]	-10 až +50
Krytí	IP67
Parametrizační možnost	pomocí 2 tlačítek a displeje na senzoru nebo pomocí PC/Notebooku s obslužným softwarem
Parametrizační rozhraní	Ethernet, 10Base-T / 100Base-TX
IP adresa	192.168.0.69
Subnet mask	255.255.255.0 (třída C)
Gateway IP adresa	192.168.0.201
MAC adresa (na štítku senzoru)	00-02-01-20-60-E8
Hmotnost [kg]	1,205

³ Špičkový proud max. 2,5 A (pulsovaný), typicky 600 mA DC.

Tabulka 3.3: Velikost obrazu

Měřicí rozsah (vzdálenost) [mm]	Délka [mm]	Šířka [mm]	Střední pixel [mm]	Minimální plocha objektu [mm]
500	420	290	6 x 6	11 x 11
1000	840	580	11 x 11	22 x 22
1500	1260	870	17 x 17	33 x 33
2000	1670	1150	22 x 22	44 x 44
2500	2090	1440	28 x 28	55 x 55
3000	2510	1730	33 x 33	65 x 65
3500	2930	2020	38 x 38	76 x 76
4000	3350	2310	44 x 44	87 x 87
4500	3770	2600	49 x 49	98 x 98
5000	4190	2890	55 x 55	109 x 109
5500	4600	3170	60 x 60	120 x 120
6000	5020	3460	66 x 66	131 x 131

Tabulka 3.4: Typický dosah⁴

Doba osvětlení [ms]	min. vzdálenost, bílá 90% [mm]	max. vzdálenost, bílá 90% [mm]	min. vzdálenost, šedá 18% [mm]	max. vzdálenost, šedá 18% [mm]	min. vzdálenost, černá 6% [mm]	max. vzdálenost, černá 6% [mm]
7,3	210	2010	90	900	50	520
10,3	850	8050	380	3600	220	2080
13,9	1240	11730	550	5250	320	3030
17,1	1500	14230	670	6360	390	3670
20,3	1720	16350	770	7310	440	4220
23,5	1920	18220	860	8150	500	4710
27,1	2120	20120	950	9000	550	5200

Přesnost měření vzdálenosti jednotlivého obrazového bodu je dána typickou zbytkovou odchylkou. Rozdíl odrazivosti způsobí nejistotu ± 10 mm stejně jako impulsní rušení (nepravidelně spouštěná měření). Okolní teplota ovlivňuje naměřená data o $0,5$ mm/K⁵.

⁴ Hodnoty v tabulce platí pro normální dynamiku a omezení pozadí.

⁵ Tyto odchylky platí pokud je senzor zapnut více jak 10 min, okolní prostředí má konstantní teplotu 23 °C a tlak 960 hPa a pokud rušivé světlo na objektu nepřesáhne hodnotu 8 klx.

4 POROVNÁNÍ SENZORŮ

Abychom si o senzoru O3D201 mohli udělat objektivnější názor, uveďme si srovnání s některými jinými optickými senzory pro měření vzdálenosti. Vybrány byli převážně senzory od společnosti SICK a jeden senzor od společnosti HOKUYO.

Na začátek ještě musíme uvést, že senzor URG a senzory řady LMS jsou pouze 2D skenery, zatímco senzory řady LD-MRS dokáží změřit planárně 4 úrovně. To znamená, že neposkytují úplná 3D data jako O3D201, ale nejsou obyčejnými 2D senzory. Proto je řadíme někde mezi 2D a 3D skenery.

Nejdůležitějšími parametry hned po měřicím rozsahu je přesnost a rychlost. Těmito parametry se O3D201 řadí mezi průměrné. Bezkonkurenčně největší dosah mají všechny senzory od SICKu. Další parametry ukazuje Tabulka 4.1.

Tabulka 4.1: Srovnání senzorů

Výrobce	Hokuyo Automatic Co.,Ltd.	SICK, spol s.r.o.				Ifm electronic GmbH
Typ senzoru	URG-04LX	LMS100-10000	LMS111-10100	LD-MRS400001	LD-MRS400102	O3D201
Rozsah	0,2 - 4 m	50 m		0,3 - 50 m	0,5 - 30 m	6,5 m
Úhlový rozsah	240 °	270 °		85 °		30 x 40 °
Přesnost (vzdálenost)	±10 mm	±40 mm		±40 mm		±20 mm
Úhlová přesnost	0,36 °	0,5 °/0,25 °		0,125 °		0,6 °
Frekvence skenování	10 Hz	25-50 Hz		12,5 Hz		20 Hz
Komunikace	USB, RS232	Ethernet		Ethernet, RS232		Ethernet
Napájení (DC)	5 V	10,8 - 30 V		9 - 27 V (typicky 12/24 V)		24 V
Spotřeba/výkon	500 mA (max. 800)	8,4 až 12 W		10 W (typicky 8 W)		600 mA (špičkově 2,5 A)
Krytí	IP64	IP65	IP67	IP68		IP67
Hmotnost	160 g	1,1 kg		1 kg		1,205 kg
Okolní teplota [°C]	-10 až 50	0 až 50	-30 až +50	-40 až +70		-10 až 50
Cena (bez DPH) ⁶	50 000,-	50 000,-	60 000,-	210 000,-	240 000,-	40 000,-

⁶ Cena je zaokrouhlena na celé desetitisíce, platná v měsíci květnu 2010.

5 KNIHOVNY

V této kapitole se budeme věnovat původním funkcím (XML funkce), jak jsou definovány výrobcem a nově vytvořeným knihovnám pro komunikaci a obsluhu senzoru.

5.1 XML funkce

Komunikace se senzorem je možná přes rozhraní používající XML-RPC protokol. Po vytvoření klienta XML-RPC pro komunikaci se serverem v senzoru, můžeme pomocí XML funkcí upravovat různá nastavení nebo si vyžádat naměřená data apod. Server naslouchá na portu 8080, který je nastaven defaultně, ale dá se změnit. Jednotlivé XML funkce s jejich parametry jsou uvedeny v této kapitole. Příkazy vyžadují následující syntaxi:

```
pXmlClient->execute ("xml-rpc_function_name", args, results);
```

kde `xml-rpc_function_name` je ukazatel na název funkce, která má být volána, `args` je pole vstupních parametrů předávané funkci a `results` jsou výstupy funkce přijaté od senzoru. Funkce můžeme podle jejich významu rozdělit do několika kategorií.

5.1.1 Funkce pro nastavení komunikace

Skupina těchto funkcí umožňuje nastavit IP adresy senzoru a komunikačního zařízení (v tomto případě počítače), masku podsítě a porty používané pro komunikaci a přenos dat. Pokud jsou parametry správně nastaveny můžeme se k senzoru připojit. Po skončení komunikace uzavřeme port funkcí pro odpojení senzoru. Většina funkcí je zdvojená – get/set. Jsou tak odděleny požadavky pro vyčtení aktuálního nastavení a změny parametrů.

V následujícím výčtu nejdůležitějších funkcí jsou uvedeny a popsány jejich vstupní i výstupní parametry. Všechny funkce naleznete v [3].

```
MDAXMLConnectCP
args[0]      IP adresa klienta
args[1]      zapnutí/vypnutí Heartbeat funkce, 0 = ON, 1 = OFF,
              v případě zapnutí se volá funkce MDAXMLHeartbeat každých
              10 s
result[0]    chybové hlášení, 0 = žádné chyby
result[1]    verze firmware
result[2]    typ senzoru
```

```

MDXMLDisconnectCP
args[0]      IP adresa klienta
result[0]    IP string

MDXMLGetIP
args[0]      bez parametrů
result[0]    chybové hlášení, 0 = OK
result[1]    IP string

MDXMLSetIP
args[0]      0
args[1]      0
args[2]      IP String
result[0]    chybové hlášení, 0 = OK

MDXMLGetSubNetmask
args          bez parametrů
result[0]     chybové hlášení, 0 = OK
result[1]     IP string

MDXMLSetSubNetmask
args[0]       0
args[1]       0
args[2]       IP string
result[0]     chybové hlášení, 0 = OK

MDXMLGetGatewayAddress
args          bez parametrů
result[0]     chybové hlášení, 0 = OK
result[1]     IP string

MDXMLSetGatewayAddress
args[0]       0
args[1]       0
args[2]       IP string
result[0]     chybové hlášení, 0 = OK

MDXMLGetDHCPMode
args          bez parametrů
result[0]     chybové hlášení, 0 = OK
result[1]     1 = DHCP mód, 0 = statická IP

MDXMLSetDHCPMode
args[0]       0
args[1]       0
args[2]       1 = DHCP mód, 0 = statická IP
result[0]     chybové hlášení, 0 = OK

```

```
MDXMLGetXmlPortCP
args          bez parametrů
result[0]     chybové hlášení, 0 = OK
result[1]     aktuální port, číslo 1 až 65535, defaultně 8080
```

```
MDXMLSetXmlPortCP
args[0]       číslo portu, 1 až 65535, defaultně 8080
result[0]     chybové hlášení, 0 = OK
```

```
MDXMLGetTCPPortCP
args          bez parametrů
result[0]     chybové hlášení, 0 = OK
result[1]     aktuální port, číslo 1 až 65535, defaultně 50002
```

```
MDXMLSetTCPPortCP
args[0]       číslo portu, 1 až 65535, defaultně 50002
result[0]     chybové hlášení, 0 = OK
```

```
MDXMLHeartbeat
args          bez parametrů
result[0]     chybové hlášení, 0 = OK
```

5.1.2 Nastavení měřicích parametrů

Tato skupina sdružuje funkce pro vyčtení a nastavení měřicích parametrů jakými jsou modulační frekvence, zapnutí/vypnutí filtrů, integrační mód, expoziční časy a další. Více funkcí v [3]. V této práci jsou vynechány funkce pro trigger mód.

```
MDXMLSetWorkingMode
args[0]       1 = spustit image server, 0 = vypnout image server
result[0]     chybové hlášení, 0 = OK
result[1]     TCP port
```

```
MDXMLGetFrontedData
args          bez parametrů
result[0]     chybové hlášení, 0 = OK
result[1]     obvykle 0
result[2]     modulační frekvence: 0 = 23MHz, 1 = 20,4MHz, 2 = 20,6MHz)
result[3]     integrace, 0 = jednoduchá, 1 = dvojí integrace
result[4]     obvykle 0
result[5]     integrační doba (krátká), číslo od 1 do 5000 (integrační
čas v mikrosekundách)
result[6]     integrační doba (dlouhá), číslo od 1 do 5000 (integrační
čas v mikrosekundách)
result[7]     obvykle 20
result[8]     aktuální ifm-time (Inter Frame Mute Time)
```

MDXMLSetFrontedData

```
args[0]    obvykle 0
args[1]    modulační frekvence: 0 = 23MHz, 1 = 20,4MHz, 2 = 20,6MHz)
args[2]    integrace, 0 = jednoduchá, 1 = dvojitá integrace (defaultně
           1)
args[3]    obvykle 0
args[4]    expoziční čas v [us] (krátká), číslo od 1 do 5000
args[5]    expoziční čas v [us] (dlouhá), číslo od 1 do 5000,
           INT1<INT2
args[6]    obvykle 20
args[7]    ifm-time v [us], číslo od 0 do 10 000
result[0]  chybové hlášení, 0 = OK
result[1]  nápoředa k chybě: zkontroluj bitové zakóování parametru
result[2]  modulační frekvence: 0 = 23MHz, 1 = 20,4MHz, 2 = 20,6MHz)
result[3]  integrace, 0 = jednoduchá, 1 = dvojitá integrace
result[4]  obvykle 0
result[5]  expoziční čas v [us] (krátká), číslo od 1 do 5000
result[6]  expoziční čas v [us] (dlouhá), číslo od 1 do 5000
result[7]  obvykle 20
result[8]  aktuální ifm-time
```

MDXMLGetTrigger

```
args      bez parametrů
result[0] chybové hlášení, 0 = OK
result[1] nastavené spouštění, 1 = náběžná hrana, 2 = sestupná
           hrana, 3 = freerunning mod (hardwarový vstup odpojen),
           4 = spouštění softwarem
```

MDXMLSetTrigger

```
args[0]    0
args[1]    0
args[2]    nastavení spouštění, 1 = náběžná hrana, 2 = sestupná
           hrana, 3 = freerunning mod (hardwarový vstup odpojen),
           4 = spouštění softwarem
result[0]  chybové hlášení, 0 = OK
```

MDXMLGetAverageDetermination

```
args      bez parametrů
result[0] chybové hlášení, 0 = OK
result[1] int
```

MDXMLSetAverageDetermination

```
args[0]    0
args[1]    0
args[2]    počet snímků, ze kterých se počítá průměr
result[0]  chybové hlášení, 0 = OK
```

MDXMLGetProgram

```
args      bez parametrů
result[0] chybové hlášení, 0 = OK
result[1] číslo programu, 7 pro framgrabber mode, jinak budou IO
           piny přepisovány
```

```

MDXMLSetProgram
args[0]    0
args[1]    0
args[2]    7 pro framegrabber mod, při každém zavolání nastaví
            defaultní hodnoty (integrační čas 2000 + 125, dvojí
            integrace, freerunning mode, framerate 4Hz, Medianový
            filtr)
result[0]  chybové hlášení, 0 = OK
MDXMLSetMedianFilterStatus
args[0]    0 = OFF, jinak ON
result[0]  chybové hlášení, 0 = OK

MDXMLGetMedianFilterStatus
result[0]  chybové hlášení, 0 = OK
result[1]  0 = OFF, jinak ON

MDXMLSetMeanFilterStatus
args[0]    0 = OFF, jinak ON
result[0]  chybové hlášení, 0 = OK

MDXMLGetMeanFilterStatus
result[0]  chybové hlášení, 0 = OK
result[1]  int 0 = OFF, jinak ON

```

5.2 Knihovny v C#

Jak již bylo zmíněno, senzor O3D201 využívá pro komunikaci ethernetové rozhraní, protokol XML-RCP pro nastavování parametrů a TCP/IP pro přenos dat. Pro snadnější práci a jednodušší vytváření uživatelských aplikací pracujících se senzorem O3D201 bylo vytvořeno několik souborů a knihoven ([8], [9], [10], [11]).

5.2.1 ScannerPMD3d.cs

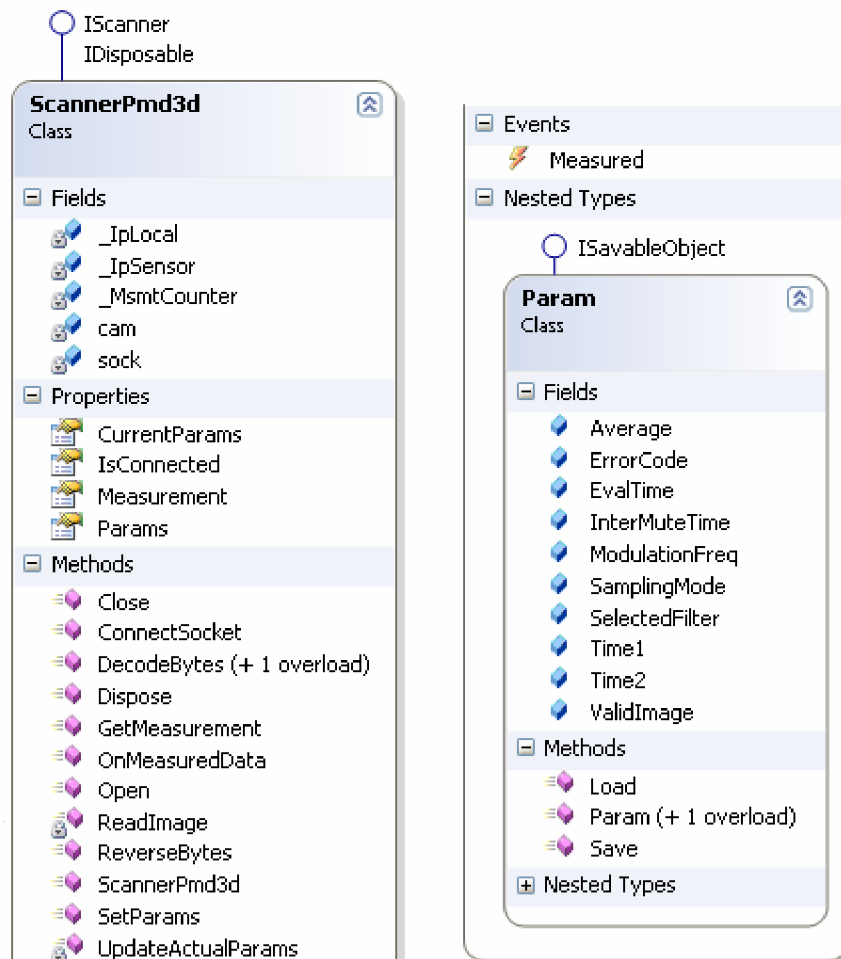
Knihovny [8] a [9] jsou předchůdcem aktuální knihovny *ScannerPMD3d.cs* [10]. Tato knihovna byla napsána M. Kopeckým v jazyce C# a je kompatibilní s verzemi .NET Framework 3.5 a 4. Byla navržena univerzálně, aby bylo možné ji snadno začlenit do sensorického systému robotu. Má unifikované rozhraní a univerzální metody pro práci se snímači - implementuje rozhraní *IScanner*, které je společné pro všechny snímače sensorického systému. Rozhraní zajišťuje univerzálnost tak, že s různými typy senzorů se komunikuje stejnými metodami. Knihovna dále implementuje rozhraní *IDisposable*, které má za úkol uvolnit prostředky při ukončení práce se snímačem⁷.

Vlastní komunikace se snímačem probíhá dvojitým způsobem. Pro vyčtení nebo nastavení parametrů snímače je implementován protokol XML-RPC. Komunikace typu klient/server probíhá na přednastaveném portu 8080. Klientem je knihovna, která posílá požadavky serveru obsaženému v senzoru. Pomocí tohoto protokolu se také inicializuje a ukončuje spojení.

⁷ Rozhraní *IScanner* a *IDisposable* byla vyvinuta robotickou skupinou při ÚAMT FEKT VUT v Brně.

Druhý způsob komunikace slouží pro přenos naměřených dat a je realizován pomocí protokolu TCP/IP na portu 50002. Data se posílají jako bytestream po přijetí žádosti o jejich zaslání (viz kap 3.2). Výsledná data mohou být podle typu žádosti v kartézském souřadném systému nebo v polárních souřadnicích. S každými naměřenými daty se posílá hlavička, ve které jsou parametry snímače v okamžiku měření a časová známka pořízení dat.

Strukturu knihovny ukazuje Obr. 5.1.



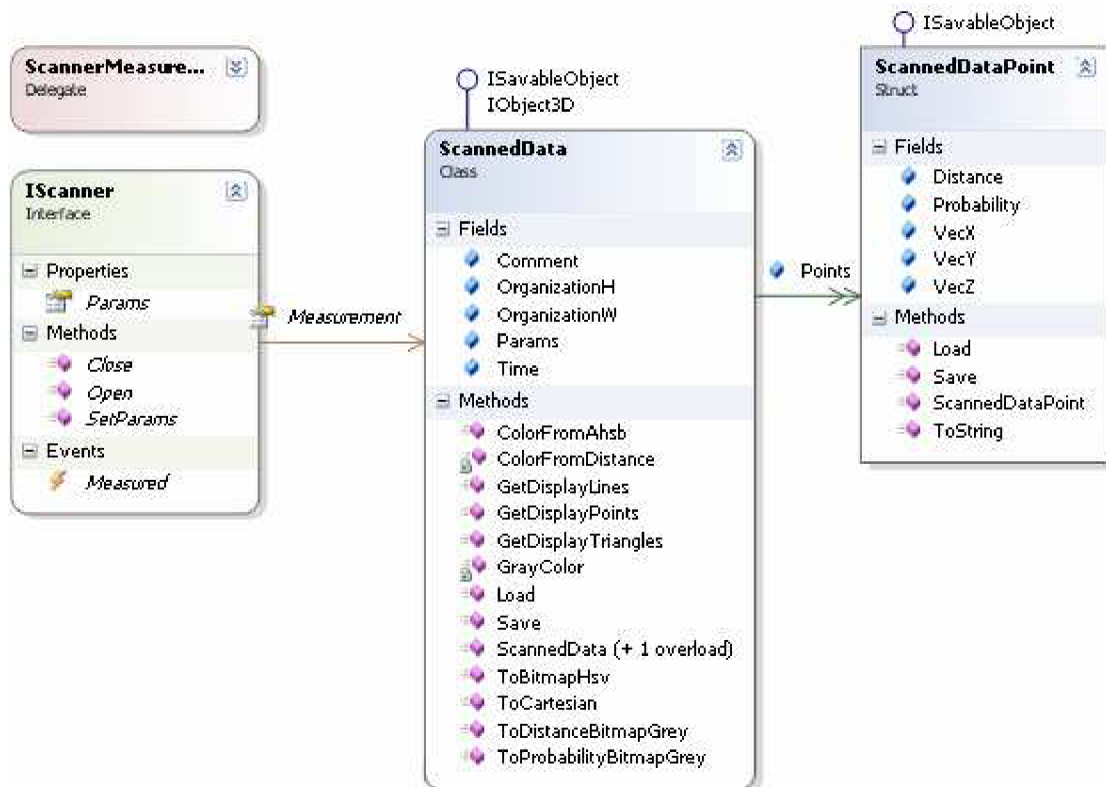
Obr. 5.1: Struktura knihovny ScannerPMD3d.cs [12]

Kromě univerzálních metod implementovaných z rozhraní *IScanner*, jakými jsou například *Open* a *Close* pro připojení/odpojení snímače nebo *SetParams* pro nastavení měřicích parametrů, poskytuje knihovna několik dalších metod. Nejdůležitější je *GetMeasurement* pro získání naměřených dat ze snímače.

5.2.2 Scanner.cs

Tato knihovna definuje univerzální metody rozhraní *IScanner*, dále metody pro zpracování dat. Univerzálním výstupem knihovny je třída *ScannedData*, která obsahuje naměřené hodnoty pro jednotlivé body. Každý bod je reprezentován strukturou *ScannedDataPoint*, která obsahuje kromě souřadnic bodu také vzdálenost v polárních souřadnicích a jasovou složku. Metody pro zpracování dat umožňují pro vizualizaci převést naměřené hodnoty do barevného nebo šedotónového měřítká. Dále je možné naměřená data ukládat do souboru a to ve formátu xml nebo jako m-file spustitelný v programu Matlab pro další zpracování.

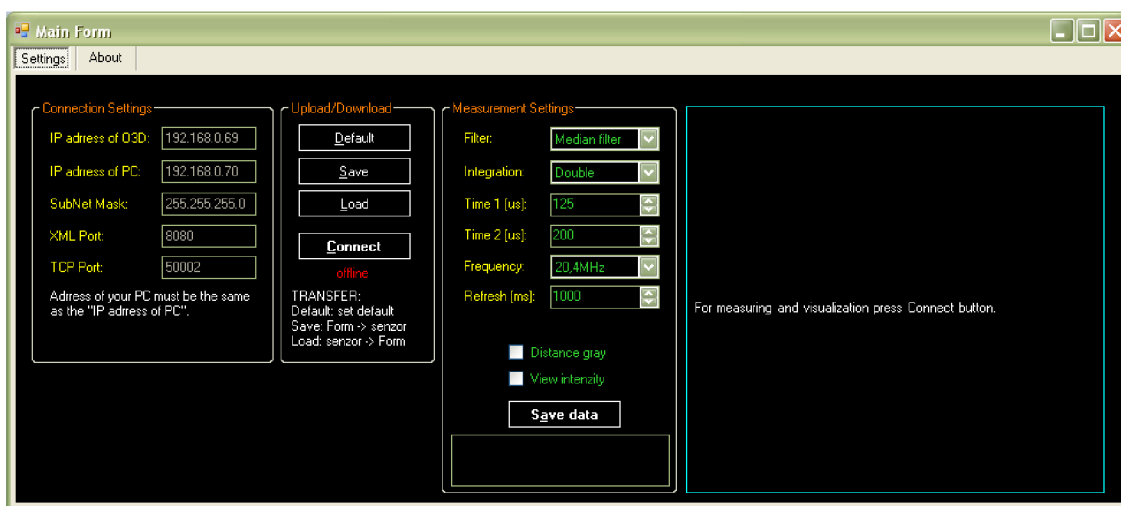
Struktura této knihovny je na Obr. 5.2.



Obr. 5.2: Struktura knihovny Scanner.cs [12]

6 O3D_APPLICATION

V rámci této diplomové práce byla vytvořena aplikace, která je naprogramována ve vývojovém prostředí Microsoft Visual Studio 2010, v jazyce C# a knihovnách .NET Framework verze 3.5. Aplikace je koncipována jako uživatelské rozhraní umožňující snadno a pohodlně obsluhovat senzor, měnit jeho nastavení, vizualizovat měřená data v reálném čase a ukládat je do souboru pro pozdější zpracování. Celkový pohled na aplikaci po spuštění ukazuje Obr. 6.1.



Obr. 6.1: Uživatelská aplikace (offline)

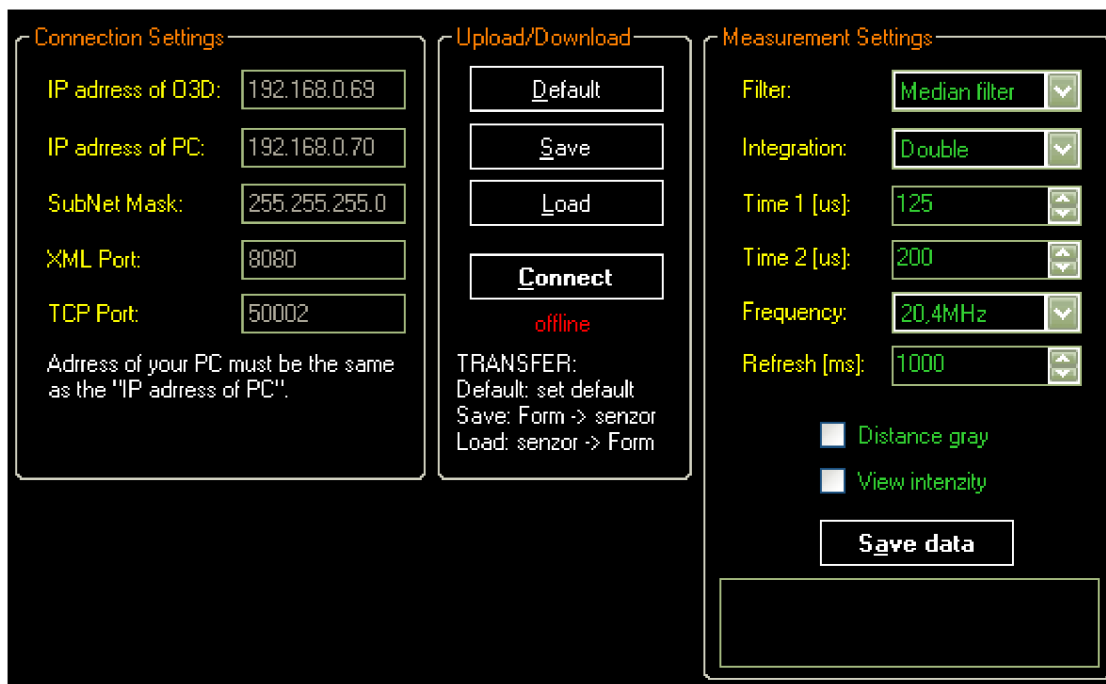


Obr. 6.2: Uživatelská aplikace - vizualizace

6.1 Uživatelské prostředí

Ovládací panel je tvořen Windows formulářem (WindowsForms technologie .NET), který je logicky rozdělen na několik částí – Obr. 6.3. V sekci *Connection Settings* se zobrazují parametry pro připojení k senzoru. IP adresa senzoru, maska podsítě a příslušné porty jsou nastaveny defaultně a nelze je měnit. IP adresu počítače, na kterém aplikace běží je v nynější verzi nutno nastavit na požadovanou, tj. 192.168.0.70. Část *Upload/Download* soustřeďuje skupinu ovládacích tlačítek. K senzoru se připojíme/odpojíme tlačítkem *Connect/Disconnect* – stav je vždy zobrazen pod tlačítkem. Tlačítka *Save* a *Load* slouží pro nastavení měřicích parametrů z formuláře do senzoru a naopak. Tlačítko *Default* nastaví do formuláře i do senzoru defaultní hodnoty. Sekce *Measurement Settings* umožňuje nastavit měřicí parametry. Z filtrů můžeme zvolit *mean*, *median*, žádný nebo oba. Integraci lze nastavit *simple* nebo *double* podle toho kolik potřebujeme expozičních časů. Expoziční časy jsou nastavovány v μs , přičemž Time 2 musí být větší než Time 1. *Refresh* udává obnovovací čas v ms, který určuje jak rychle se překresluje vizualizace.

Vizualizace naměřených dat je umístěna v pravé části panelu dle Obr. 6.1. Spouští se automaticky po připojení senzoru. Vzdálenost lze zobrazit barevně nebo ve stupních šedi (zatržítka *Distance gray*), zatržením *View intenzity* zobrazíme šedotónovou hodnotu a získanou z korelační funkce (viz kap 2.1). Data je možné uložit pomocí tlačítka *Save data*. Aplikace umožňuje k ukládaným datům připsat komentář. Náhled na vizualizaci ukazuje Obr. 6.2. Všechna tlačítka lze ovládat i klávesovými zkratkami (Alt + příslušné písmenko). Ukládání měřicích parametrů je navíc možné klávesou Enter.

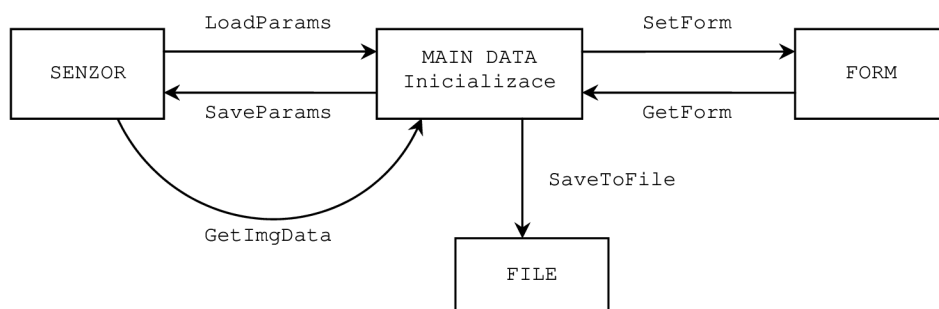


Obr. 6.3: Uživatelská aplikace - nastavení

6.2 Popis funkce programu

Uživatelská aplikace je rozčleněna do několika souborů. Využívá metody z knihoven [10] a [11] popsaných v kapitole 5.2. Hlavní program je v souboru *FormMain.cs*, vizualizaci v reálném čase zajišťuje soubor *Vizualizace.cs* a v souboru *Settings.cs* jsou definovány třídy proměnných. Třída *Connection* definuje parametry pro připojení k senzoru (odpovídá parametrům v sekci *Connection Settings* uživatelské aplikace). Měřicí parametry nastavitelné ve formuláři spolu s parametry získanými z hlavičky naměřených dat sdružuje třída *Measurement*. Třída *Data* obsahuje kromě *imgheader* (typu *Measurement*) také pole naměřených dat a bitmapy pro vizualizaci.

Logické uspořádání nejdůležitějších metod aplikace prezentuje Obr. 6.4. Metody *SaveParams* a *LoadParams* ukládají nebo načítají parametry z/do senzoru. Pro formulář jsou to metody *SetForm* a *GetForm*. Vyčtení naměřených dat i s měřicími údaji v jednom okamžiku zajišťuje *GetImgData*, ukládání do souboru pak metoda *SaveToFile*.



Obr. 6.4: Logický diagram aplikace

Po spuštění aplikace se do formuláře načtou defaultní hodnoty. Senzor je offline. Stisknutím tlačítka *Connect* (nebo klávesovou zkratkou Alt + C) se aplikace pokusí připojit k senzoru. Aktuální stav se zobrazuje pod tlačítkem. Pokud se připojení nezdařilo, objeví se hlášení o chybě. Proběhlo-li připojení v pořádku a senzor je online, načtou se měřicí parametry ze senzoru a nastaví se do formuláře (pomocí sekvence *LoadParams*, *SetForm*). Dále se spustí cyklické měření a vizualizace s obnovovací dobou nastavenou parametrem *Refresh* ve formuláři. Automaticky se vykresluje vzdálenost převedená do modifikovaného HSV barevného modelu. Modifikace spočívá v oříznutí barevné stupnice, neboť bez modifikace by nejbližší a nejbližší předměty byly zobrazeny stejnou barvou. Pokud nechceme vzdálenost barevně, zatržením *Distance Gray* zajistíme zobrazení v odstínech šedi. Pro vizualizaci intenzity je nutné zaškrtnout *View intenzity*. Intenzitu je možné zobrazit pouze v šedotónu. Vedle každého vizualizovaného obrazu je umístěno měřítko s vypsáním minimální a maximální naměřené hodnoty. Pod zobrazením vzdálenosti jsou vypsány nejdůležitější parametry získané z hlavičky příchozích naměřených dat. Parametr

Sampling udává zvolenou integraci (1 = dvojitá integrace, 0 = jednoduchá integrace). *Eval Time* značí čas, jak dlouho trvalo změření a zpracování dat (ms).

Je-li senzor online, může uživatel libovolně měnit měřicí parametry v sekci *Measurement Settings*. Tlačítkem *Save* (klávesová zkratka Alt + S nebo Enter) se uloží hodnoty uvedené ve formuláři do senzoru (*GetForm*, *SaveParams*). Pokud budou expoziční časy nastaveny mimo rozsah 1-5000 μ s nebo nebude splněna podmínka $Time 1 < Time 2$, parametry se neuloží a objeví se chybové hlášení. Pro načtení hodnot ze senzoru do formuláře slouží tlačítko *Load* nebo klávesová zkratka Alt + L (*LoadParams*, *SetForm*), nastavení defaultních hodnot provede tlačítko *Default* s kl. zkratkou Alt + D (*SaveParams*, *SetForm*).

Ukládání dat probíhá nezávisle na zvoleném způsobu vizualizace. Stisknutím tlačítka *Save data* nebo klávesovou zkratkou Alt + A se provede uložení dat do souboru typu m-file (počítá se s pozdějším zpracováním dat v Matlabu). Název souboru je ve formátu *PMD_RRRR_MM_DD_hh_mm_ss.m*, kde *RRRR* odpovídá roku, *MM* měsíci, *DD* dni v měsíci, *hh* hodině, *mm* minutě a *ss* sekundě v datu a čase uložení souboru. Uložený soubor obsahuje struktury s naměřenými daty (vektory X, Y, Z, vzdálenost a intenzita), hlavičkou, časovou značkou a případným komentářem, který uživatel vepsal do příslušného textového pole v aplikaci. Měřicí parametry uložené v hlavičce umožňují opakovatelnost měření.

Ukončení spojení mezi senzorem a aplikací je možné stiskem tlačítka *Disconnect* (viditelné je-li senzor online) nebo klávesovou zkratkou Alt + C. Po odpojení senzoru zůstanou vizualizována poslední naměřená data.

6.3 Naměřená data

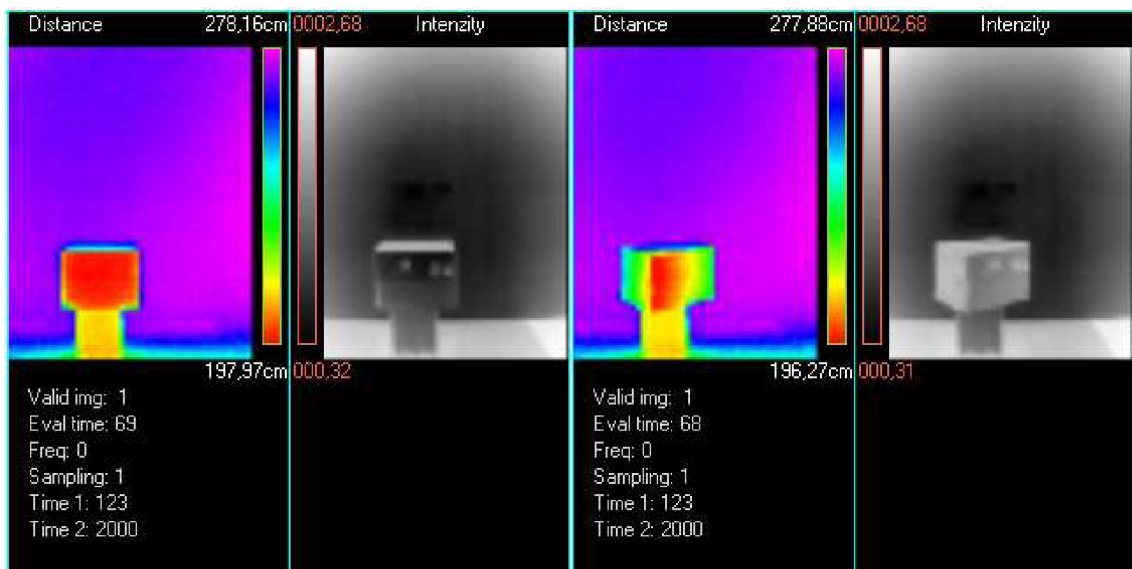
Pomocí výše uvedené aplikace bylo provedeno množství experimentů s cílem ověřit činnost a základní vlastnosti senzoru O3D201. Pro usnadnění práce byl senzor připevněn na stativ, aby bylo zajištěno, že se s ním v průběhu měření nepohne – viz Obr. 6.5. Všechny experimenty proběhly uvnitř budovy v robotické laboratoři, která je pro tyto účely dostatečně prostorná. Prostředí bylo osvětleno zářivkami, průměrná intenzita osvětlení při rozsvícení všech stropních světel byla 330 lx.

Měřené scény jsou zdokumentovány několika fotografiemi a obrázky zachycujícími vizualizaci v O3D_Application. Příklad takové scény prezentuje Obr. 6.6. Naměřená data byla pomocí aplikace uložena do m-file, pro možnost pozdějšího zpracování.

Experimenty byly zaměřeny na zjištění vlivu okolního světla, přesnost měření vzdálenosti a detekci předmětů z různých materiálů při různém natočení. Dále byly měřeny scény s objevenými parazitními parametry. Detailnější popis a rozbor výsledků bude popsán v kapitole 8.



Obr. 6.5: Upevnění senzoru na stativ



Obr. 6.6: Scéna z krabicí (kolmo a šikmo k senzoru)

7 APLIKACE V PROSTŘEDÍ MATLAB

Zatímco předchozí aplikace sloužila pro zobrazování v reálném čase, tato část je věnována zpracování dat dříve naměřených (někdy se označuje též anglickým ekvivalentem post-processing). Data musí být uložena v m-file definovaným způsobem (zajišťuje *O3D_Application*). Aplikace byla vytvořena pro usnadnění vizualizace a následnou analýzu z naměřených dat. Nejedná se o uživatelskou aplikaci, ale pouze o nástroj sloužící k poloautomatickému zpracování dat. Jedná se vlastně o spustitelný soubor m-file (vytvořený v programu MATLAB® verze R2009b), který se dá modifikovat podle potřeb v závislosti na požadovaném zpracování.

7.1 Vytvořený program

Nynější verze programu se skládá ze dvou souborů – *OpenFiles.m* a *ViewImg.m*. Hlavní je *OpenFiles.m*. Po jeho spuštění se otevře dialogové okno pro výběr souborů, které chceme vizualizovat. Dialogové okno má přednastaven filtr na soubory '*.m' a umožňuje vybrat více souborů. Po potvrzení výběru jsou načteny názvy všech vybraných souborů (proměnná *FileNames*) a cesta k nim (*PathName*). Nebyl-li vybrán žádný soubor, objeví se hlášení o chybě. Byl-li vybrán alespoň jeden soubor do proměnné *FileName* se načte název (v případě více souborů prvního z nich). Pokud bylo vybráno více souborů nastaví se parametr *repeater* na hodnotu 1. Nyní se zavolá funkce *ViewImg.m*. Vstupními parametry jsou jméno souboru a cesta k němu. Protože naměřená data jsou v souboru uložena ve struktuře, funkce provede přepočty a příslušné transformace. Výsledky zobrazí do okna *Figure 1* (podrobnější popis tohoto okna je v následující kapitole).

Funkce nyní očekává vstup – z grafu je možné změřit vzdálenost, která nás zajímá. Kliknutím levého tlačítka myši se načte souřadnice bodu (doporučuje se měřit v 2D zobrazení – viz kap 7.2). Počet bodů, které chceme změřit není omezen. Ukončení měření se provede klávesou Enter. Funkce očekává ještě jeden vstup, pro který provede zobrazení v řezu (vzdálenost i intenzita). Poté se vypočítá vzdálenost pro získané souřadnice (proměnná *bod*). Počítá se i průměrná hodnota bodu s jeho čtyřokolím pro případ, že vybraný bod by byl šumem nebo špatně naměřenou hodnotou (proměnná *ctyrokoli*). Výstupem funkce *ViewImg* jsou vektory *x* a *y* odpovídající souřadnicím změřených bodů, vektory *bod* a *ctyrokoli* udávající vzdálenost v měřených bodech, matice *distance* a *intenzity* obsahující vzdálenost a intenzitu pro všechny body a v poslední řadě komentář.

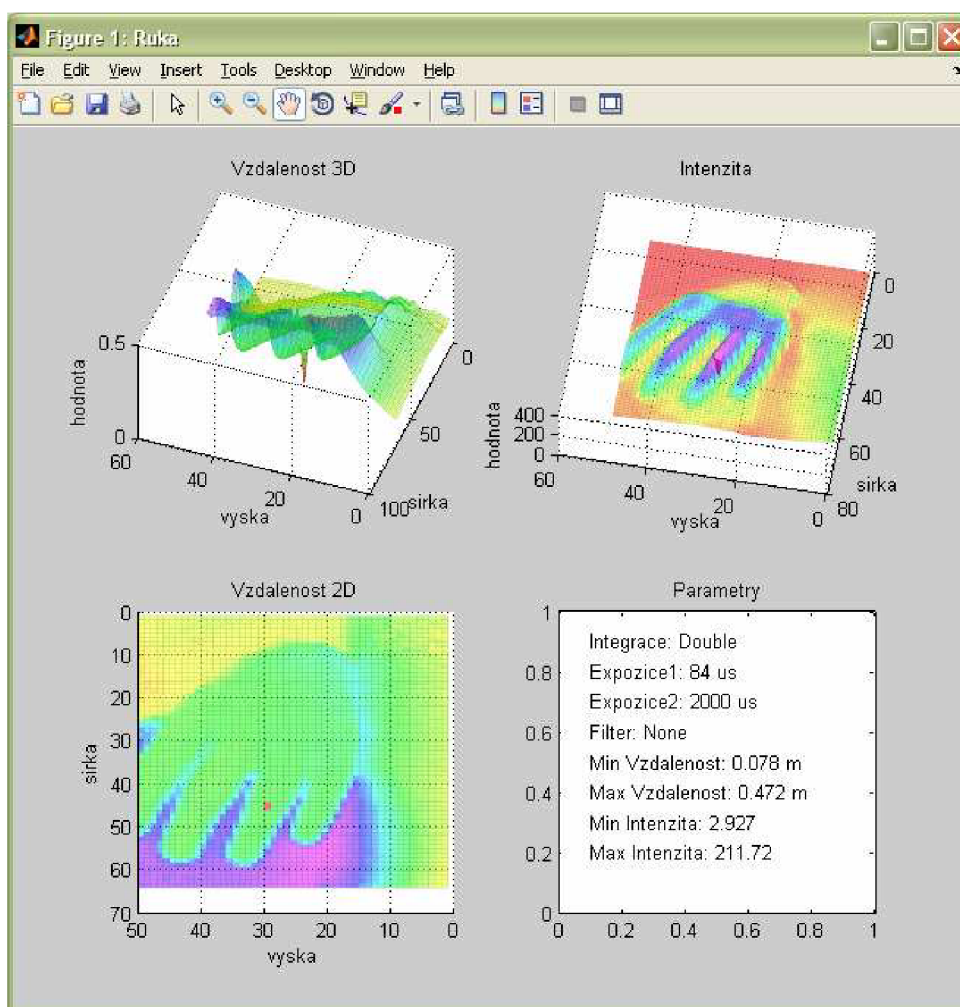
Hlavní soubor vypíše na obrazovku *bod* a *ctyrokoli*, pokud byl vybrán jen jeden soubor, program končí. Bylo-li vybráno více souborů, čeká na stisk libovolné klávesy, aby načtl jméno dalšího souboru a provedl znovu volání funkce *ViewImg*. Je-li parametr *repeater* = 1, do proměnné *note* se uložily názvy všech souborů vybraných v dialogovém okně a při otevření souboru i příslušný komentář.

7.2 Vizualizace uložených dat

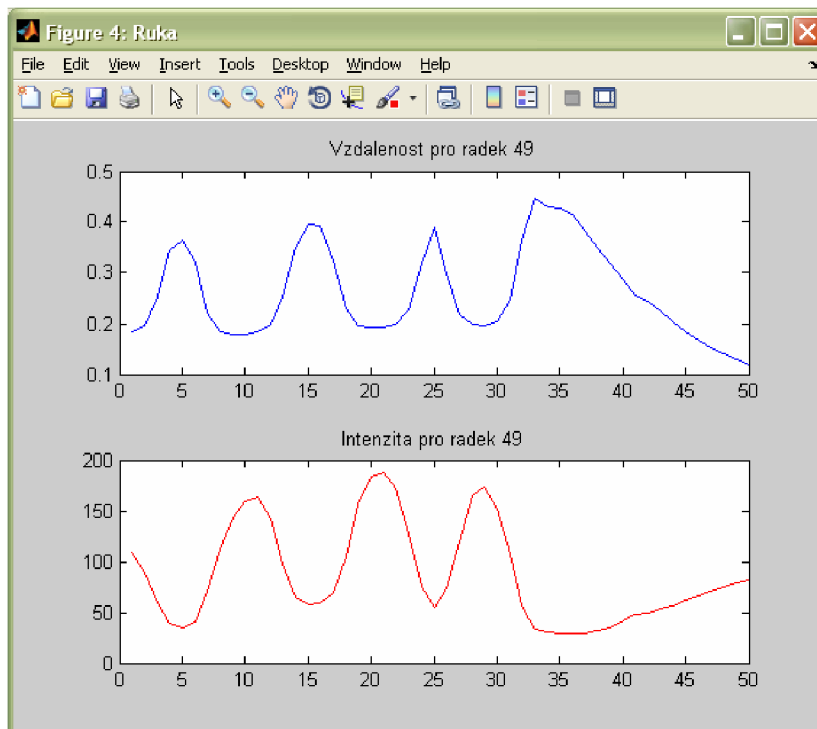
První vizualizační okno *Figure 1* je rozděleno na čtyři části – viz Obr. 7.1. První část (vlevo nahoře) vizualizuje vzdálenost ve 3D, druhá část (vlevo dole) ukazuje vzdálenost z pohledu osy Z – rádo by 2D zobrazení. Ve třetí části (vpravo nahoře) je znázorněna intenzita v 3D. Všechny tři grafy zobrazují hodnoty v modifikovaném HSV barevném modelu. Parametry, při kterých bylo měření provedeno, jsou vypsány ve čtvrté části spolu s maximálními a minimálními hodnotami.

Měření vzdálenosti vybraných bodů se doporučuje v 2D zobrazení pro vyloučení chyby špatně zaznamenaných souřadnic, jak by se mohlo stát při překrývajících se hodnotách v 3D zobrazení.

Do druhého vizualizačního okna – *Figure 4* se vykreslí zobrazení v řezu, tj. vykreslí se řádek naměřených hodnot vzdálenosti (Obr. 7.2 – modře) a intenzity (Obr. 7.2 – červeně).



Obr. 7.1: Vizualizace v Matlabu



Obr. 7.2: Vizualizace v Matlabu - řez

8 ANALÝZA MĚŘENÍ

Chceme-li o senzoru tvrdit, že je dobrý nebo špatný, musíme ho nejdříve prověřit. Zjistit jaké má vlastnosti, parametry, jak se chová za normálních podmínek a při změně prostředí, zda výrobcem udávané parametry souhlasí apod. Nezanedbatelným faktorem při hodnocení kvalit snímače je jeho použití. Musíme si položit otázku, pro jaké účely má sloužit a tomu přizpůsobit kritéria hodnocení. Dalším krokem je realizovat takové experimenty a měření, abychom jimi obsáhli všechna potřebná kritéria a především, abychom byli schopni výsledky zpracovat korektně.

Senzor O3D201 je proximální 3D skener, který zkoumáme za účelem možnosti použití v robotice. Nejdůležitějšími parametry bude přesnost a rychlost měření vzdálenosti, dále vliv různých materiálů a povrchů při detekci objektů. Protože se jedná o laserový skener, bude nás také zajímat, zda má změna osvětlení nějaký vliv na kvalitu měření, případně jak velký. Z popisu senzoru v kapitole 2.1 a 3 je zřejmé, že výsledky měření jsou ovlivněny nejen měřicí metodou, chcete-li hardwarem, ale negativně se může projevit především špatné nastavení měřících parametrů. Na to je třeba si dát při měření pozor a při každém experimentu zkontrolovat, zda je nastavení senzoru optimální (s ohledem na zkoumané kritérium).

Pomocí aplikací popsaných výše (kap. 6 a 7) bylo naměřeno a analyzováno mnoho experimentů za účelem ověřit vlastnosti předloženého proximálního skeneru O3D201. Tato kapitola se bude zabývat pouze experimenty, které jsou nějakým způsobem zajímavé a podporují zjištěné výsledky. Všechna naměřená data, jejich vizualizace, fotografie a další příslušná dokumentace je k nalezení na CD.

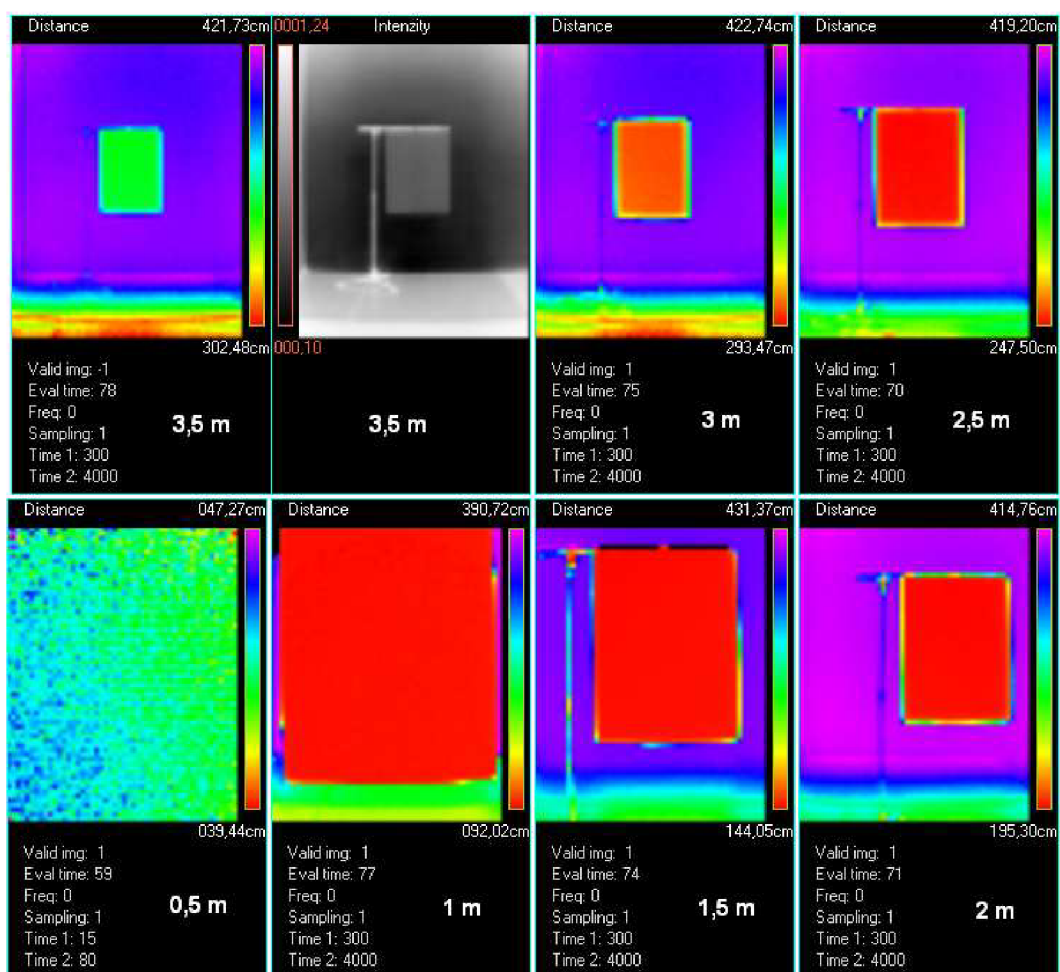
8.1 Přesnost měření vzdálenosti

Pro určení přesnosti naměřené vzdálenosti je potřeba mít přesnější přístroj, který bude použit jako etalon. V tomto případě byl použit laserový dálkoměr Leica DISTO A5 (dále jen Leica). Jeho přesnost udávaná výrobcem je $\pm 1,5$ mm (pro rozsah měřené vzdálenosti do 30m).

Ověření přesnosti naměřené vzdálenosti senzorem O3D201 bylo provedeno na scéně, kterou ukazuje Obr. 8.1. Senzor byl umístěn na stativu ve výšce 1 m nad zemí ve vzdálenosti 4 m od stěny. Na stojánku mezi stěnou a senzorem byla umístěna kartonová deska. Měření bylo provedeno pro sedm vzdáleností od senzoru (0,5 až 3,5 m s krokem 0,5 m). Vzdálenost byla měřena na čtyřech bodech kartonové desky – na fotografii patrné jako malé modré body. Vizualizaci scény pomocí *O3D_Application* znázorňuje Obr. 8.2. Tabulka 8.1 udává hodnoty naměřené měřicím přístrojem Leica, hodnoty změřené pomocí *OpenFiles.m* a výsledky jejich porovnání.



Obr. 8.1: Scéna 1: Přesnost měření, foto



Obr. 8.2: Scéna 1: Přesnost měření, vizualizace

Tabulka 8.1: Scéna 1: Přesnost měření vzdálenosti

l [m]	Leica DISTO A5				O3D201				øΔ [m]	øδ [%]	
	bod 1	bod 2	bod 3	bod 4	bod 1	bod 2	bod 3	bod 4			
karton	3,5	3,492	3,494	3,500	3,498	3,522	3,526	3,532	3,537	0,033	0,951
	3,0	2,994	2,981	2,994	3,001	3,033	3,007	3,019	3,054	0,036	1,194
	2,5	2,491	2,483	2,494	2,500	2,495	2,488	2,497	2,497	0,004	0,151
	2,0	1,990	1,978	2,000	2,001	1,963	1,965	1,973	1,975	0,023	1,166
	1,5	1,503	1,510	1,514	1,508	1,454	1,471	1,477	1,471	0,040	2,685
	1,0	0,983	0,995	1,003	1,001	0,954	0,953	0,965	0,949	0,040	4,039
	0,5	0,472	0,457	0,457	0,477	0,443	0,425	0,429	0,441	0,031	6,705

Průměrná absolutní chyba $\delta\Delta$ je spočítána jako průměr z absolutních hodnot dílčích odchylek:

$$\delta\Delta = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 |bod_{iLEICA} - bod_{iO3D}| \quad (8.1),$$

průměrná relativní odchylka $\delta\delta$ pak jako:

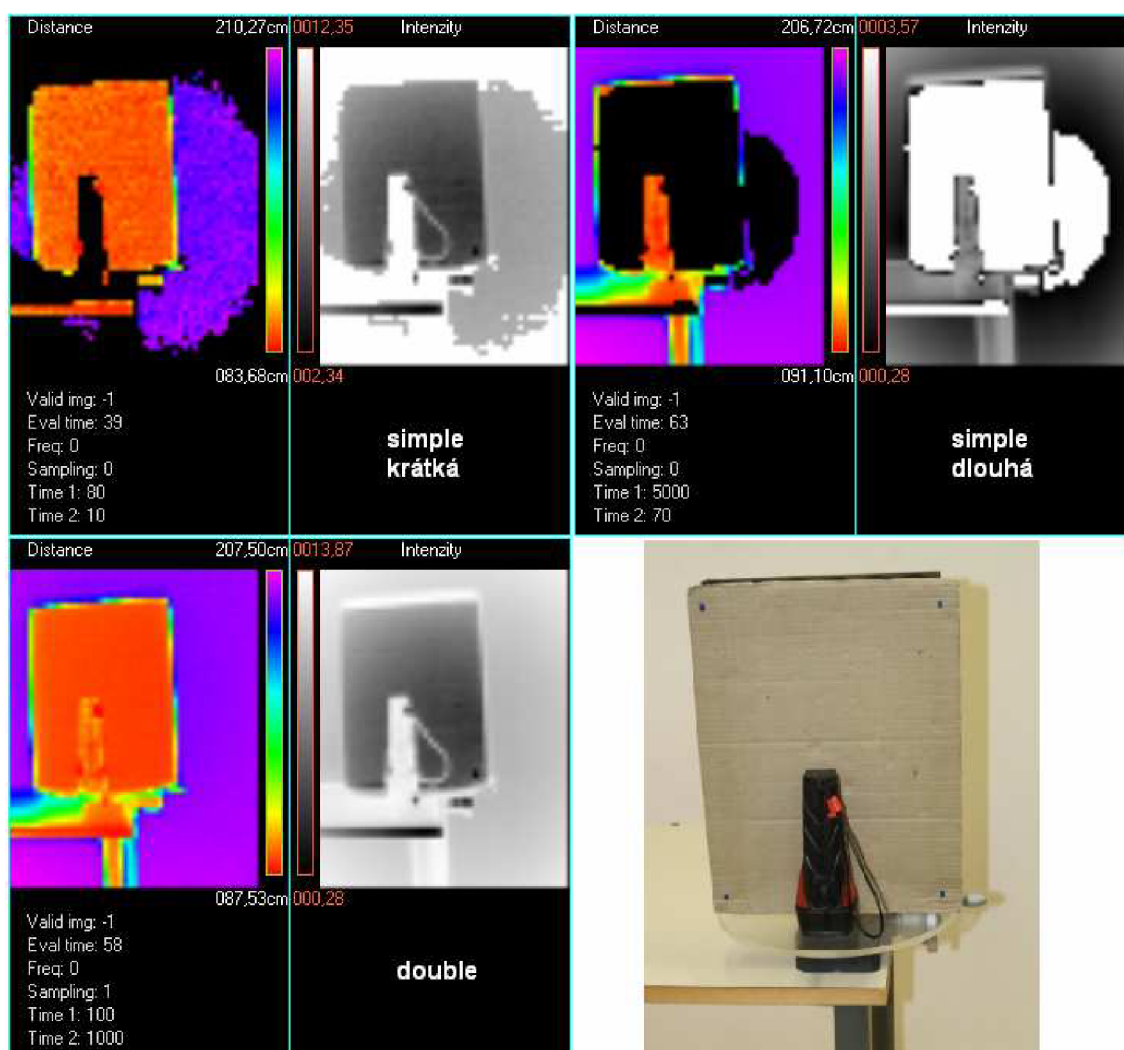
$$\delta\delta = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 \left(\frac{bod_{iLEICA} - bod_{iO3D}}{bod_{iLEICA}} \cdot 100 \right) \quad (8.2).$$

Z vizualizace dat (Obr. 8.2) bychom pouhým pohledem na vykreslené obrázky mohli nabít dojem, že pro vzdálenost 0,5 m bude hodnota značně kolísat. To je způsobeno jen barevným vjemem, neboť již z pohledu na měřítko vyčteme, že rozdíl max. a min. hodnoty je přibližně 3 cm, což odpovídá vypočítané průměrné absolutní odchylce. Z průměrné chyby nevyčteme jaké znaménko měla dílčí odchylka, ale není těžké porovnat hodnoty naměřené Leicou a senzorem O3D201, ze kterých vidíme, že nej přesnější hodnota je pro vzdálenost 2,5 m. S větší vzdáleností se odchylka pohybuje v záporných číslech a s menší vzdáleností v kladných. Dle mého názoru je to způsobeno optikou senzoru. Lze ji totiž mechanicky zaostřit (pootočením šroubku na zadní straně senzoru) na blízké, vzdálené nebo středně vzdálené objekty. V době měření byla ponechána na střední hodnotě, což by odpovídalo největší přesnosti při vzdálenosti 2,5 m.

Z tohoto experimentu vyplývá, že přesnost měření (při správně nastavené expozici) závisí na zaostření optiky. Pro vzdálenost, na kterou je zaostřeno, se odchylka pohybuje $\pm 0,5$ cm, pro větší/menší vzdálenosti se odchylka pohybuje v záporných/kladných číslech – v absolutní hodnotě 3-4 cm.

8.2 Expoziční doba, rychlost měření

Následující scéna demonstruje, jak důležité je správné nastavení expoziční doby. Pro názornost byla použita jednoduchá integrace. Na Obr. 8.3 je scéna, kdy se senzor nachází přibližně 2 m od stěny, ve vzdálenosti 1 m má překážku (karton, svítidla). V levém horním rohu obrázku vidíme výsledek měření při jednoduché integraci a krátké expoziční době (80 μ s). Scéna není dostatečně osvětlena, detekovány jsou pouze předměty blízko a předměty s malou pohltivostí (velkou reflektivitou), ostatní objekty ve scéně jsou podexponované. Vpravo nahoře je naopak expoziční doba příliš dlouhá (5000 μ s). Předměty blízko a s velkou reflektivitou jsou přesvícené. Problém odstraníme nastavením expoziční doby někde mezi tyto hodnoty (stanovíme experimentálně tak, aby bylo co nejméně špatně exponovaných bodů v obraze) nebo použitím dvojí integrace, jak ukazuje levý dolní roh obrázku.



Obr. 8.3: Scéna 2: Různé expoziční doby

Za zmínku také stojí doba měření (parametr *EvalTime*), která je závislá na době expoziční. Pro první případ s krátkou expozicí 80 μ s trvalo měření a zpracování dat 39 ms. Podle informací dle kapitoly 3.1 by se doba zpracování měla orientačně vypočítat následovně:

$$evaluationtime = 4 * INT1 + 4 * INT2 + 30ms \quad (8.3).$$

Přičemž INT1, INT2 jsou expoziční doby (v případě jednoduché integrace se počítá pouze větší expoziční doba) a 30 ms je přibližná doba potřebná pro zpracování.

Dosadíme-li do výpočtu expoziční doby z tohoto experimentu, zjistíme, že s expoziční dobou 80 μ s vychází doba zpracování 30,3 ms, tedy zhruba o 10 ms méně. Při druhé situaci byla integrační doba 5000 μ s, podle výpočtu by mělo zpracování trvat 50 ms, ale *EvalTime* je 63 ms. Pro dvojí integraci je *EvalTime* 58 ms, přitom dosažením expozičních dob 100 a 1000 ms do výpočtu se dostáváme na 34,4 ms. Pro přehlednost byly vyjmenované hodnoty zapsány do Tabulka 8.2. Odchylka od vypočítané a skutečné doby je pro jednoduchou integraci asi 10 ms, pro dvojitou integraci zhruba 20 ms. Domnívám se, že odchylka koresponduje s ifm time. Jedná se o nastavitelný parametr, který se během měření neměnil – defaultně je nastaven na hodnotu 10. Pokud by se inkrementoval k době potřebné pro zpracování dat (pro každou expoziční dobu), výsledky by odpovídaly skutečnosti lépe. Upravený vzorec by vypadal takto:

$$evaluationtime = (4 * INT1 + ifmTime) + (4 * INT2 + ifmTime) + 30ms \quad (8.4).$$

Tabulka 8.2: Scéna 2: Rychlost měření

Integrace	Expoziční doba [μ s]	EvalTime [ms] vypočítaná	EvalTime [ms] naměřená
Simple	80	30,3	39
Simple	5000	50	63
Double	100 + 1000	34,4	58

8.3 Materiály s různým úhlem natočení

Nejčastějším problémem při detekci objektů je jejich povrch, přesněji závislost přesnosti měření na druhu a struktuře povrchu a na úhlu odrazné plochy. Proto byla provedena měření pro různé materiály s různým natočením vůči ose senzoru. Sestavení scény je zachyceno na Obr. 8.4. Senzor byl upevněn na stativu 1 m nad zemí, 2 m od stěny. Mezi senzorem a stěnou byl na stůl instalován natáčecí mechanismus se středem otáčení ve vzdálenosti 1 m od senzoru. Pro měření byly použity desky vyrobené z různých materiálů – karton, linoleum, hobra (dřevovláknitá deska), koberec a molitan.

Měření bylo zpracováno stejným způsobem jako v kapitole 8.1 – jako etalon sloužil dálkoměr Leica DISTO A5, měřeny byly čtyři body v každém kroku experimentu. Naměřené hodnoty a dosažené výsledky shrnuje Tabulka 8.3. Průměrná absolutní odchylka a průměrná relativní odchylka byly spočteny dle rovnic 8.1 a 8.2.



Obr. 8.4: Scéna 3: Rozložení scény pro měření s různými materiály

Tabulka 8.3: Scéna 3: Materiály s různým úhlem natočení

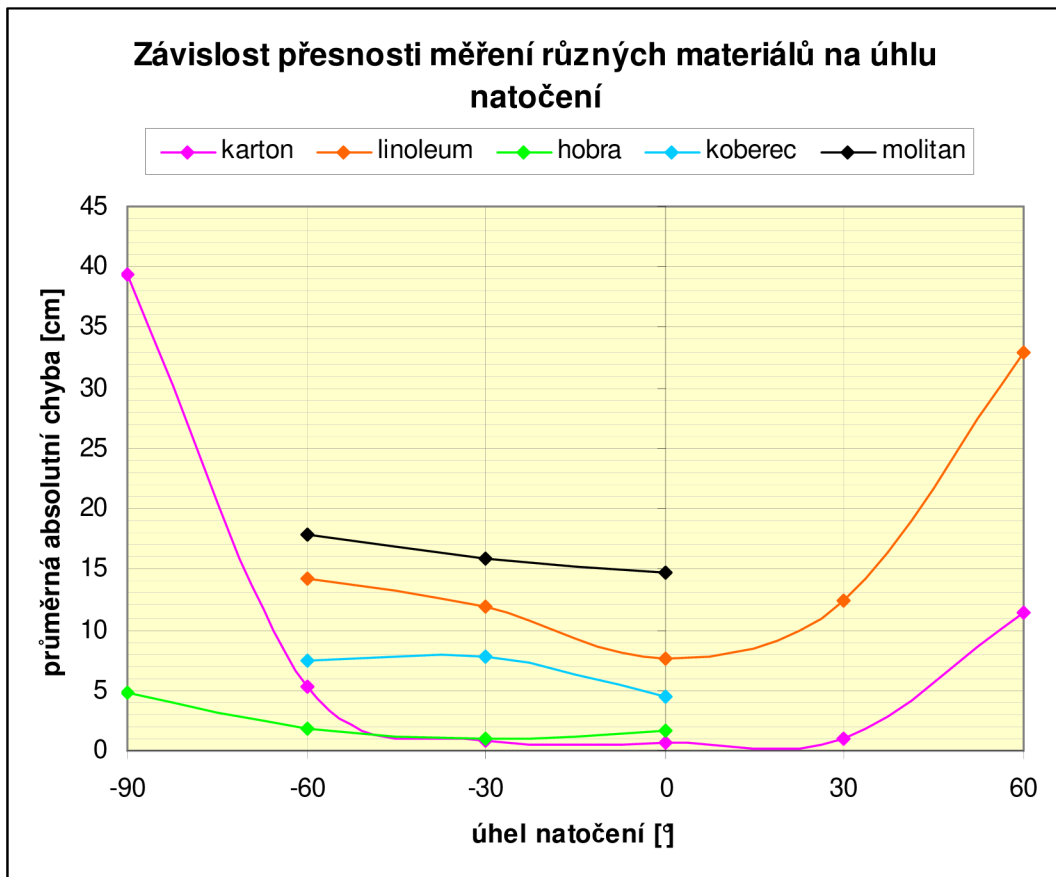
I [m]	úhel [°]	Leica DISTO A5				O3D201				øΔ [m]	øδ [%]
		bod 1	bod 2	bod 3	bod 4	bod 1	bod 2	bod 3	bod 4		
karton	-90	0,824	1,213	1,217	0,837	1,363	1,503	1,520	1,277	0,393	38,07
	-60	0,839	1,167	1,160	0,841	0,885	1,233	1,237	0,867	0,054	5,93
	-30	0,903	1,089	1,089	0,915	0,920	1,090	1,081	0,908	0,008	0,90
	0	1,009	0,994	0,991	1,016	1,011	0,990	0,982	1,003	0,007	0,50
	30	1,100	0,895	0,891	1,085	1,097	0,892	0,895	1,117	0,011	0,35
	60	1,161	0,822	0,819	1,116	1,273	0,912	0,916	1,275	0,115	10,81
	90	1,213	0,779	0,781	1,180	x	x	x	x	x	x
linoleum	-90	0,869	1,145	1,144	0,858	x	x	x	x	x	x
	-60	0,881	1,129	1,128	0,880	1,053	1,297	1,239	0,999	0,143	14,75
	-30	0,940	1,071	1,067	0,934	1,059	1,197	1,174	1,058	0,119	11,48
	0	1,006	0,990	0,996	1,012	1,116	1,074	1,027	1,089	0,076	7,51
	30	1,070	0,923	0,928	1,090	1,236	1,043	1,030	1,200	0,125	13,17
	60	1,108	0,872	0,879	1,141	1,473	1,139	1,107	1,601	0,330	29,83
	90	1,158	0,891	0,898	1,165	x	x	x	x	x	x
hobra	-90	0,881	1,172	1,165	0,867	0,862	1,297	1,125	0,861	0,048	5,42
	-60	0,873	1,116	1,121	0,878	0,890	1,124	1,080	0,883	0,018	2,11
	-30	0,939	1,052	1,060	0,929	0,922	1,052	1,047	0,917	0,011	1,01
	0	1,010	0,991	0,987	1,003	0,991	0,976	0,973	0,985	0,017	1,60
koberec	-90	0,885	1,143	1,154	0,869	x	x	x	x	x	x
	-60	0,889	1,126	1,114	0,884	0,999	1,196	1,151	0,963	0,074	7,30
	-30	0,932	1,065	1,058	0,932	1,107	1,115	1,095	0,983	0,078	8,99
	0	1,008	0,994	0,984	1,002	1,082	1,027	1,016	1,044	0,045	4,64
molitan	-90	0,846	1,155	1,155	0,841	x	x	x	x	x	x
	-60	0,865	1,127	1,131	0,862	1,078	1,291	1,287	1,042	0,178	17,66
	-30	0,923	1,071	1,063	0,924	1,103	1,234	1,200	1,082	0,160	15,87
	0	1,004	0,988	0,982	1,005	1,204	1,146	1,082	1,135	0,147	15,37
stěna	0	1,993	1,994	1,990	1,996	2,015	1,997	1,993	2,010	0,011	0,47

Dle očekávání byly nejlepší výsledky dosaženy při nulovém natočení, tj. předmět byl kolmo k ose senzoru. Pro přehlednost byly výsledky průměrné absolutní chyby δ vykresleny do grafu – Obr. 8.5. Z grafu je patrné, že při natočení 0° byla nejlépe detekována deska z kartonu a hobra z odchylkou nepřesahující 2 cm, naopak nejhůře byl detekován molitan s průměrnou chybou 14,7 cm. Změna natočení se projevila nejvýrazněji u linolea, což splnilo předpoklady. Naproti tomu předpoklad, že chyba měření vzdálenosti u kartonu bude při větším natočení neměnná nebo jen o málo větší, byl klamný, neboť při natočení -60° byla chyba 5,4 cm a pro 60° dokonce 11,5 cm. V porovnání je tak nárůst chyby při detekci kartonu větší než u molitanu. Překvapivě nejmenší závislost na natočení se objevila u dřevovláknité desky, kde se průměrná chyba nedostala přes 5 cm a to ani při natočení -90° . Nutno podotknout, že osa otáčení mechanismu byla (při všech měřeních) umístěna mimo osu senzoru právě proto, aby se mohlo provést měření i pro tento extrémní úhel – viz Obr. 8.6, přesto pro některé materiály nebylo možné měření pod úhlem 90° do analýzy zahrnout.

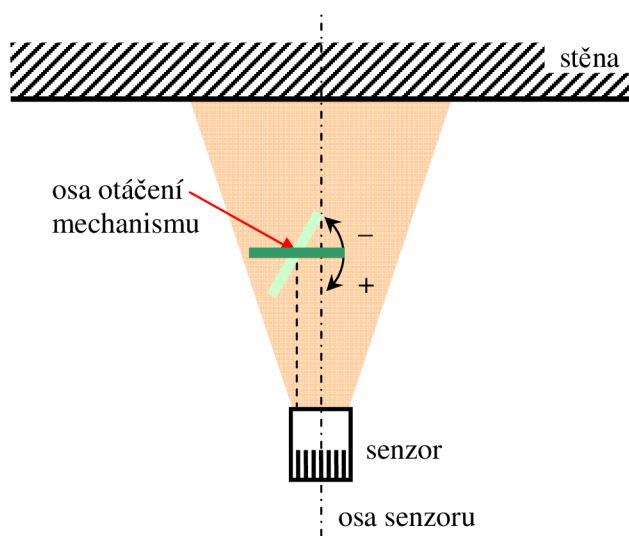
Při následné analýze pomocí Matlabu bylo sledováno zachování rovné plochy měřených desek. Obr. 8.7 prezentuje výsledky v řezech (řádek 30) pro všechny materiály, modře je znázorněna naměřená vzdálenost, červeně intenzita. Vpravo dole je pak ještě obrázek vizualizace z aplikace *O3D_application* pro lepší představivost, co řezy znázorňují. Řezy obrazem byly provedeny z měření při úhlu -60° , dvojí integraci, bez použití filtru. Z řezů vyobrazujících vzdálenost je zřejmé, že pro materiály karton, linoleum a hobra byla rovná plocha dodržena. Pro koberec se objevuje zanedbatelné zvlnění, ale molitan je nerovný. Pokud bychom těmito výsledky proložili fiktivní přímkou (pouze úseky, kde byl detekován předmět), zjistili bychom, že pro všechny materiály má stejný sklon až na linoleum, zde vychází sklon větší. Řezy intenzitou dokumentují závislost na materiálu. Vidíme, že největší útlum má bezpochyby molitan, jehož průběh intenzity nezávisí na vzdálenosti, hned za ním je koberec. U zbývajících tří materiálů intenzita klesá se vzdáleností (tak by to mělo být), přičemž hodnoty pro linoleum a karton jsou srovnatelné, zatímco hobra má intenzity znatelně vyšší – v maximu až dvojnásobně. Můžeme si také všimnout, že u hran objektu jsou překmity.

Speciální případ nastal při natočení linolea o -90° , kdy se světlo odražené od linolea promítlo na stěnu za ním a výrazným způsobem se projevilo v měřené intenzitě. Situaci dokumentuje Obr. 8.8, ve kterém jsou také zobrazeny řezy řádkem 30 a řádkem 34, ve kterém se odražené světlo projevilo nejvíce. Z řezů se zdá, že na změřené vzdálenosti se toto neprojevilo (na stěně se neobjevil žádný fiktivní objekt).

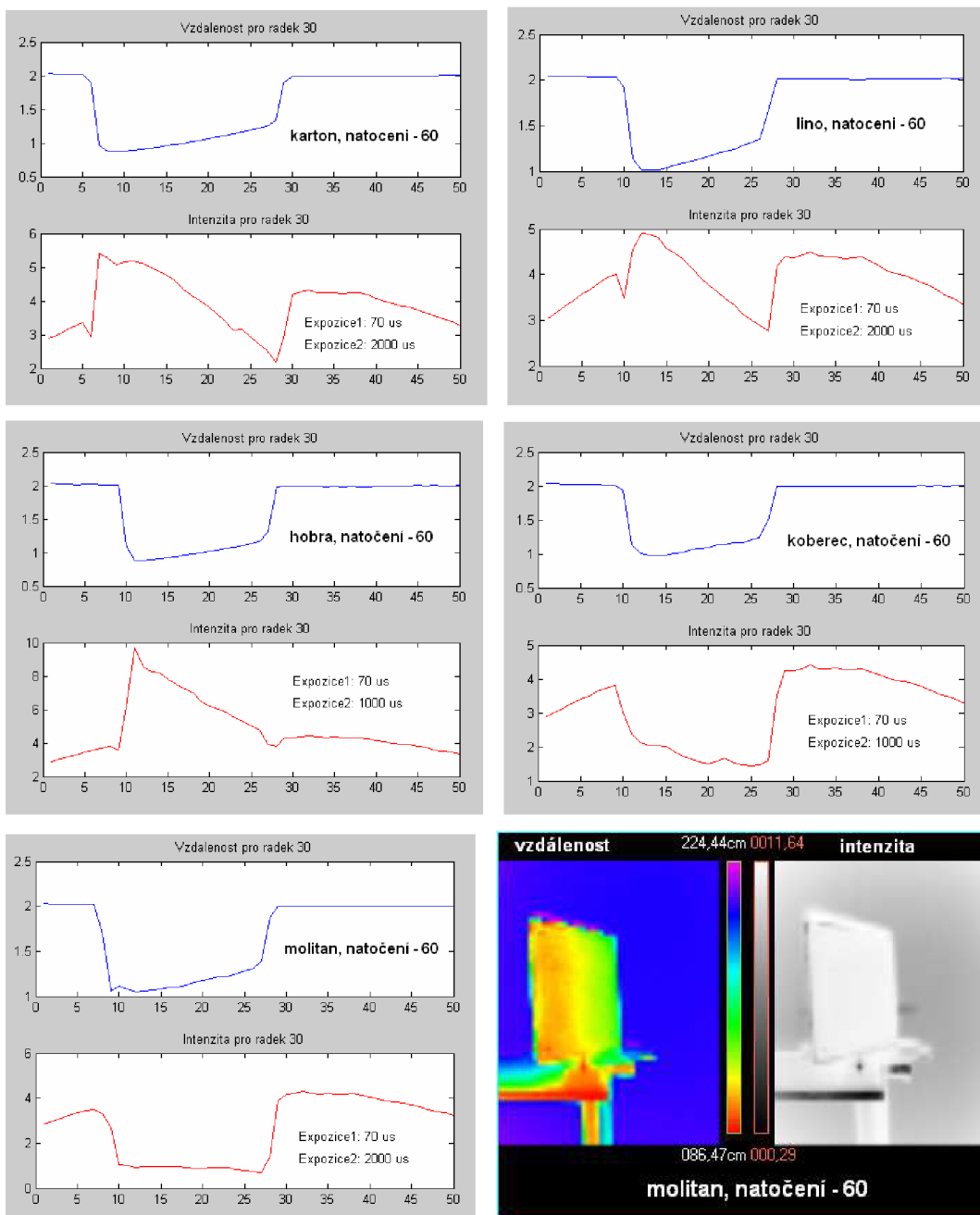
Experiment dokazuje, že senzor dokáže nejlépe detekovat papír a nelakované dřevo, s lesklými a měkkými materiály má problém, protože odrážejí málo světla zpět do senzoru. Lesklé předměty ho odrazí většinu jiným směrem a měkké materiály jako molitan světlo pohltí.



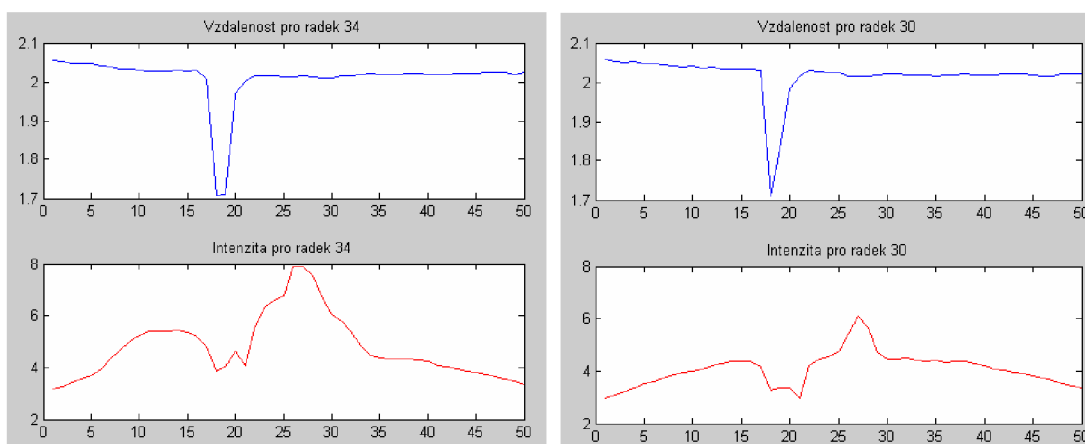
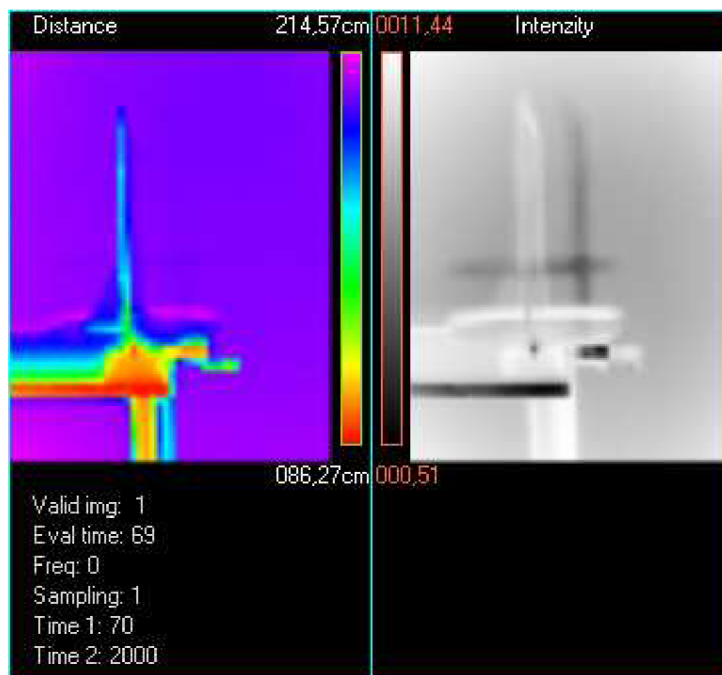
Obr. 8.5: Scéna 3: Průměrná absolutní chyba



Obr. 8.6: Scéna 3: Náčrtek scény - půdorysně



Obr. 8.7: Scéna 3: Řezy obrazem pro natočení -60°, všechny materiály



Obr. 8.8: Scéna 3: Linoleum, natočení -90° , odraz v intenzitě

8.4 Měřicí obrazec – kontrasty

Při měření vzdálenosti optickými snímači dochází k nepřesnosti měření v důsledku různých vlastností materiálů (struktura povrchu, homogenita, lesklost/matnost, atd.). Velkou roli hraje i barva u objektu, který je vyroben z jednoho materiálu. Řeč je o vlivu kontrastu na přesnost měření. Pro ověření tohoto vlivu u senzoru O3D201 bylo provedeno měření s měřicím obrazcem – Obr. 8.9. Na stěnu byl připevněn měřicí obrazec o rozměru 1,05x1,05 m. Větší čtverce v obrazci mají stranu 5 cm. Měření bylo provedeno pro přibližné vzdálenosti 3, 2 a 1 m, kdy ve scéně nebyl kromě obrazce žádný jiný objekt, dále pro vzdálenost 4 m, kdy se ve scéně objevil člověk.



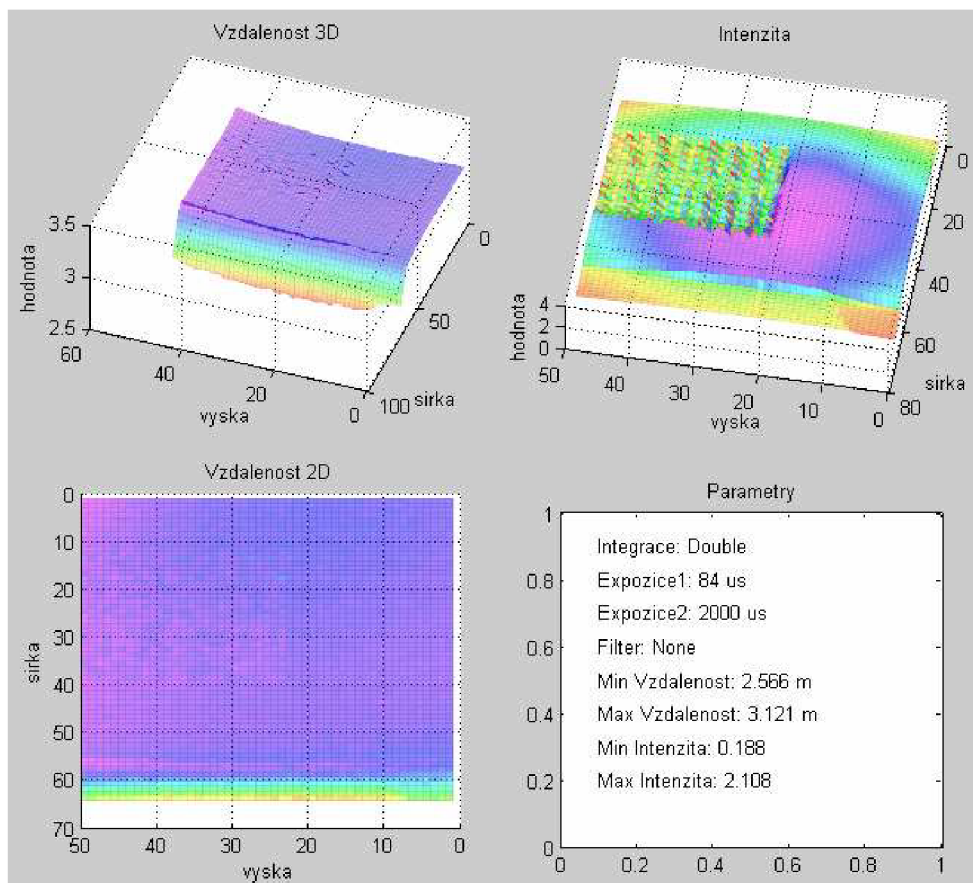
Obr. 8.9: Scéna 4: Měřicí obrazec – foto

Na Obr. 8.10 je výsledek měření pro situaci, kdy se senzor nachází ve vzdálenosti 3 m od stěny s měřicím obrazcem. Z vyobrazené naměřené vzdálenosti bychom asi nepoznali, jestli je obrazec detekován správně nebo špatně. Na vyobrazené intenzitě už je ale jasně patrné jeho umístění ve scéně. Řez vzdáleností a intenzitou je na Obr. 8.11. Z řezu vzdálenost je vidět, že stěna není detekována bez výchylek, ale místo kde se objevuje měřicí obrazec jsou výchylky o poznání větší než šum na holé stěně. Pohybují se v rozmezí ± 2 cm.

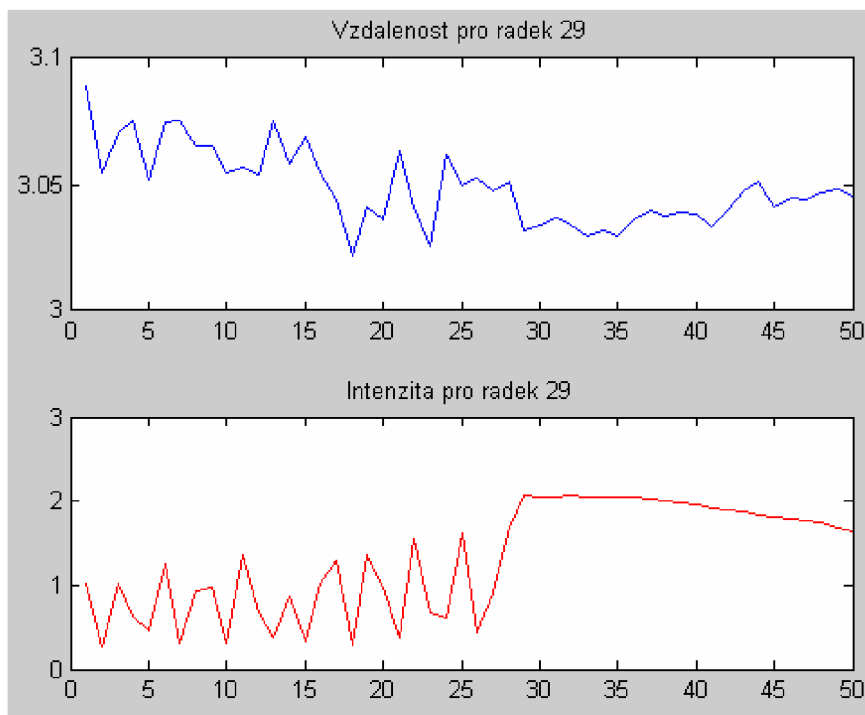
Při vzdálenosti senzoru 2 m od stěny už byl měřicí obrazec vidět i ve vizualizaci vzdálenosti (odchylky v řezu ± 2 cm). Obr. 8.12 prezentuje výsledky pro vzdálenost 1 m, kdy téměř celou viditelnou plochu zakrývá měřicí obrazec. Výsledky v řezu (Obr. 8.13) ukazují maximální výchylku až ± 4 cm.

Poslední série obrázků tohoto experimentu zachycuje scénu, kdy je senzor ve vzdálenosti 4 m od stěny s měřicím obrazcem a 3 m před senzorem stojí člověk. Ve vizualizaci na Obr. 8.14 je silueta člověka dominantní, obrazec není rozeznatelný, na vizualizaci intenzity je velmi výrazný. Obr. 8.15 ukazuje řez v úrovni loktů stojícího člověka. V řezu vzdálenosti rozeznáme tělo a ruce člověka, v pozadí vidíme lehce zvlněné místo s obrazcem. Na detailu je rozeznat maximální odchylka ± 2 cm.

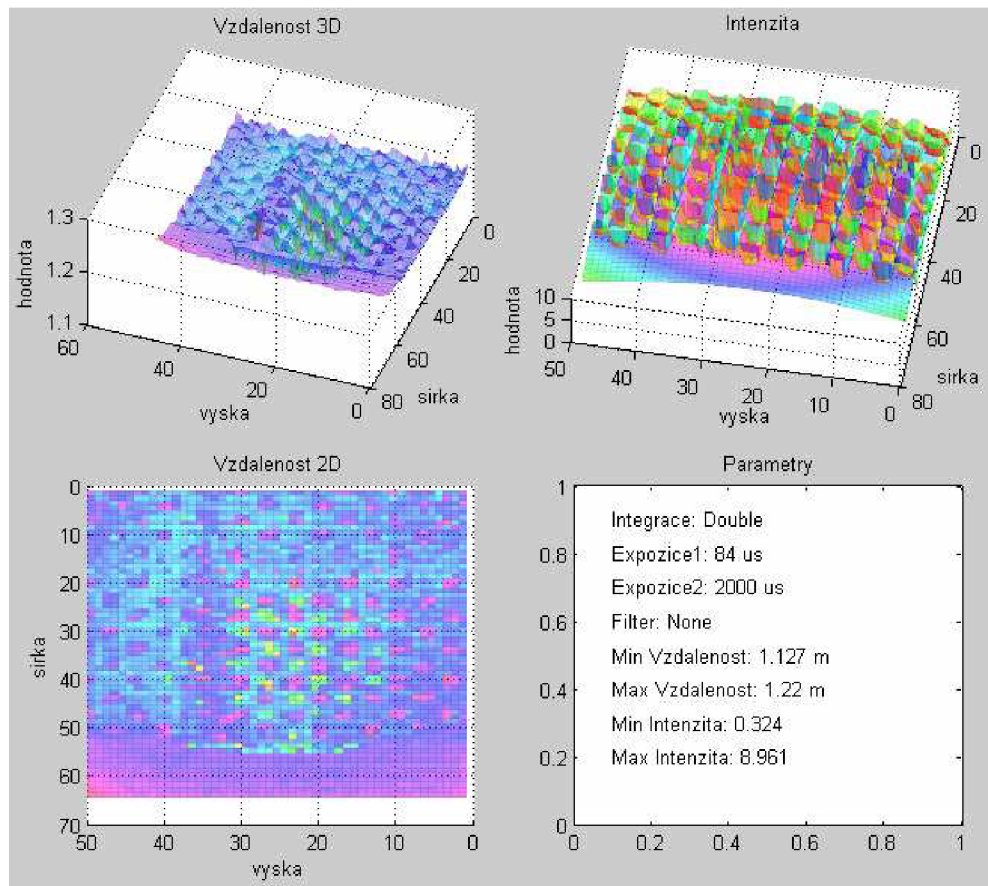
Na Obr. 8.14 můžeme zpozorovat ještě jeden efekt a sice, že člověk vytváří svůj vlastní stín, přesněji řečeno se světlo od něj odráží a linoleum toto světlo reflektuje zpět do senzoru. Výsledkem je odraz člověka v podlaze, který se projevil na detekované vzdálenosti (v intenzitě se téměř neprojevil). Chyba způsobená tímto odrazem se pohybuje kolem 30 až 40 cm (při vzdálenosti 3 m) – viz řez na Obr. 8.17.



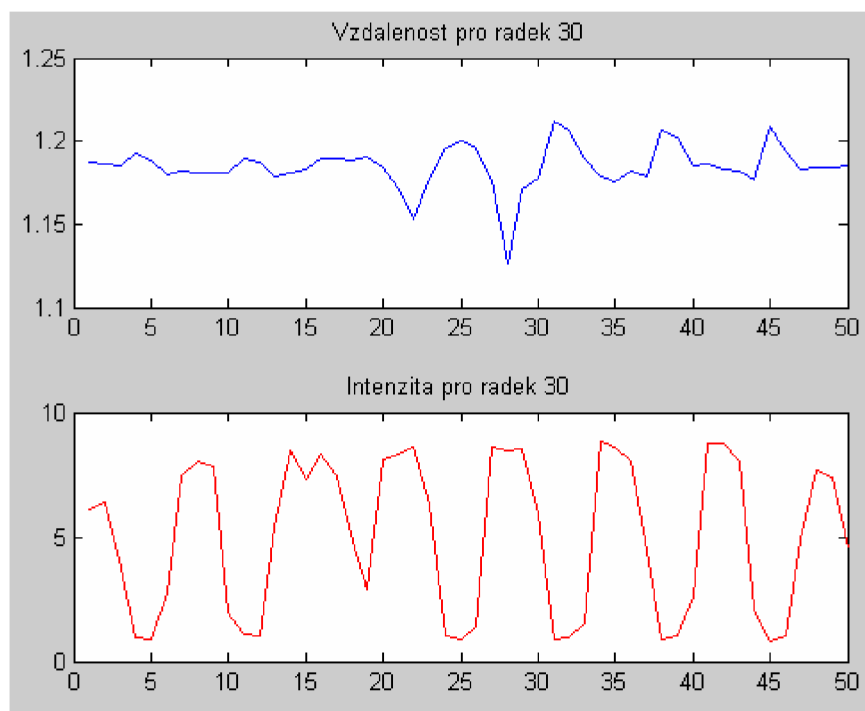
Obr. 8.10: Scéna 4: Měřicí obrazec, vzdálenost 3 m



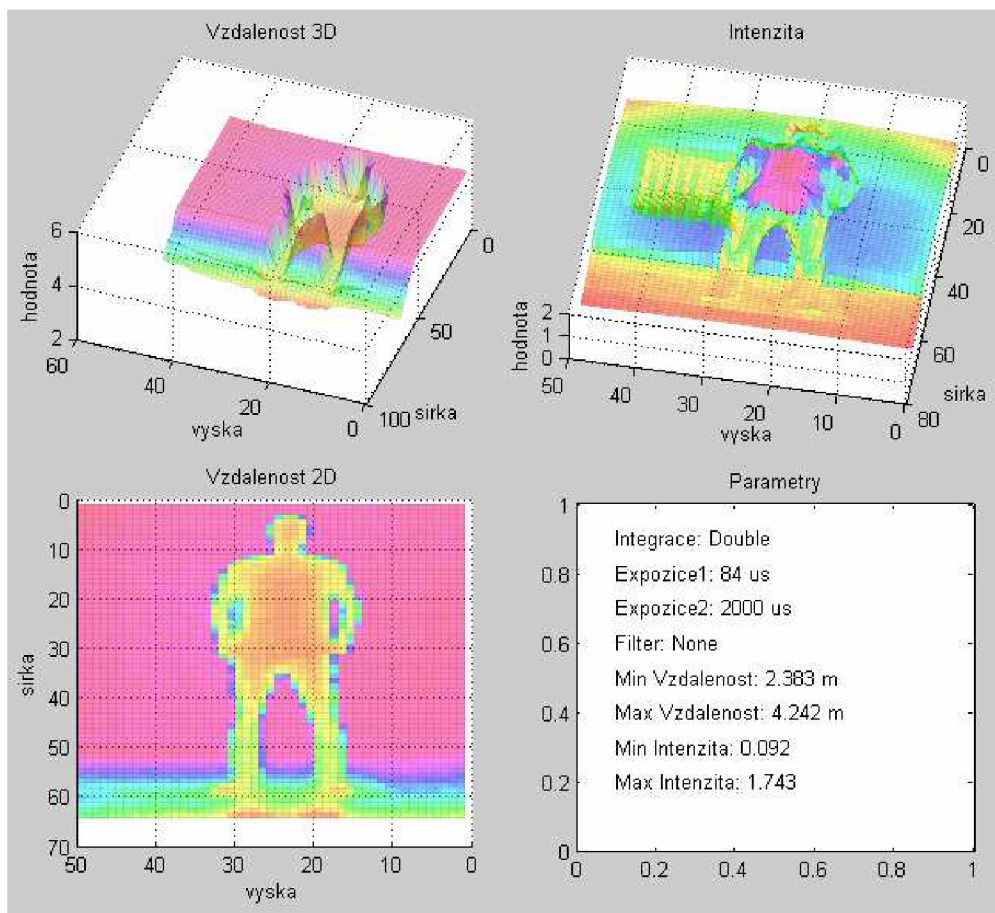
Obr. 8.11: Scéna 4: Měřicí obrazec, vzdálenost 3 m, v řezu



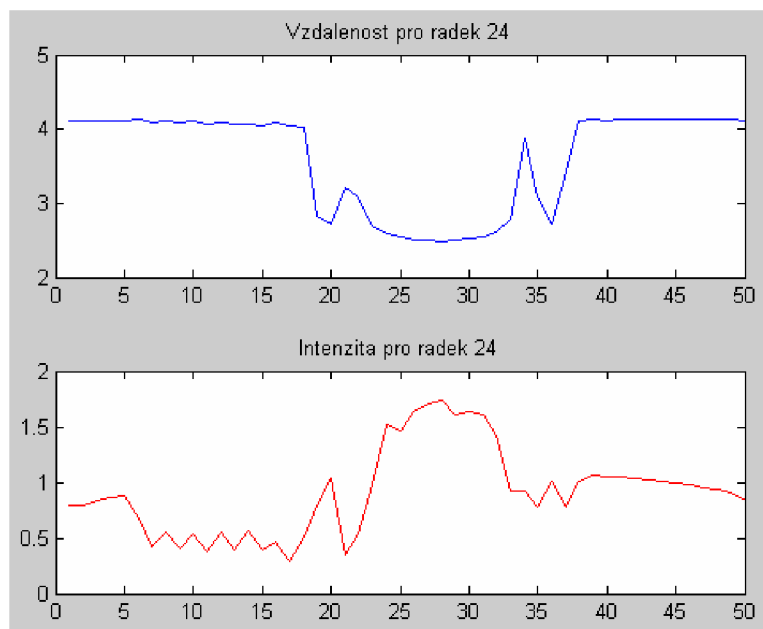
Obr. 8.12: Scéna 4: Měřicí obrazec, vzdálenost 1 m



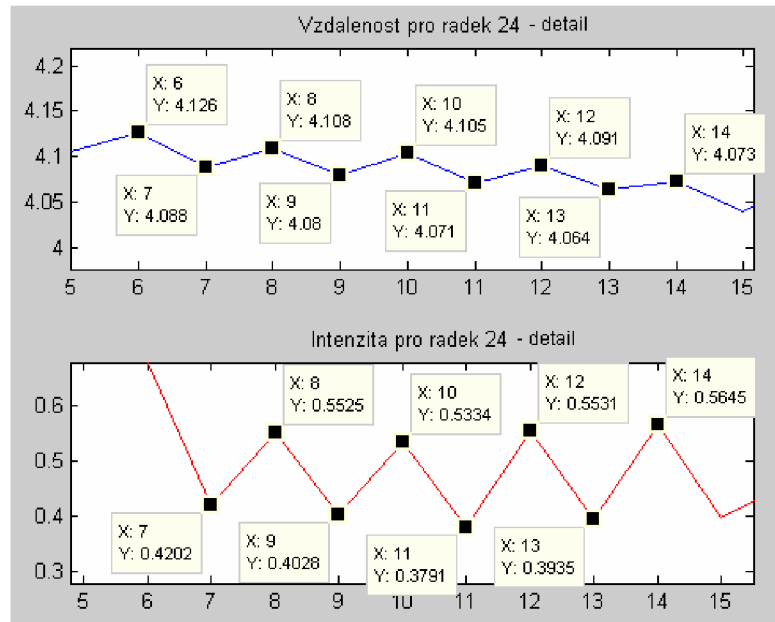
Obr. 8.13: Scéna 4: Měřicí obrazec, vzdálenost 1 m, v řezu



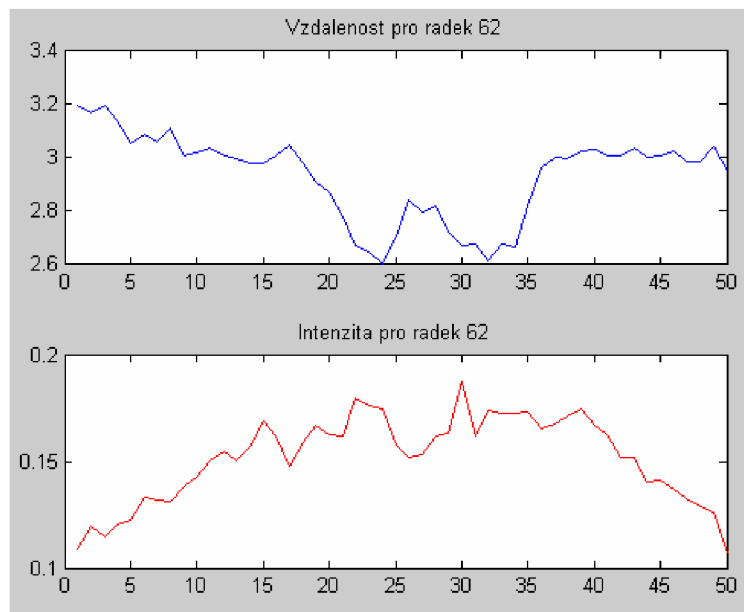
Obr. 8.14: Scéna 4: Měřicí obrazec, vzdálenost 4 m, člověk 3 m



Obr. 8.15: Scéna 4: Měřicí obrazec, vzdálenost 4 m, člověk 3 m, v řezu



Obr. 8.16: Scéna 4: Měřicí obrazec, vzdálenost 4 m, člověk 3 m, detail řezu



Obr. 8.17: Scéna 4: Měřicí obrazec, vzdálenost 4 m, člověk 3 m, v řezu

8.5 Vliv světla na přesnost měření

Nyní již víme, že přesnost měření může být ovlivněna materiálem detekovaného objektu, jeho barvou a úhlem natočení. Jak je to s vlivem okolního světla, na to se zaměřuje další experiment.

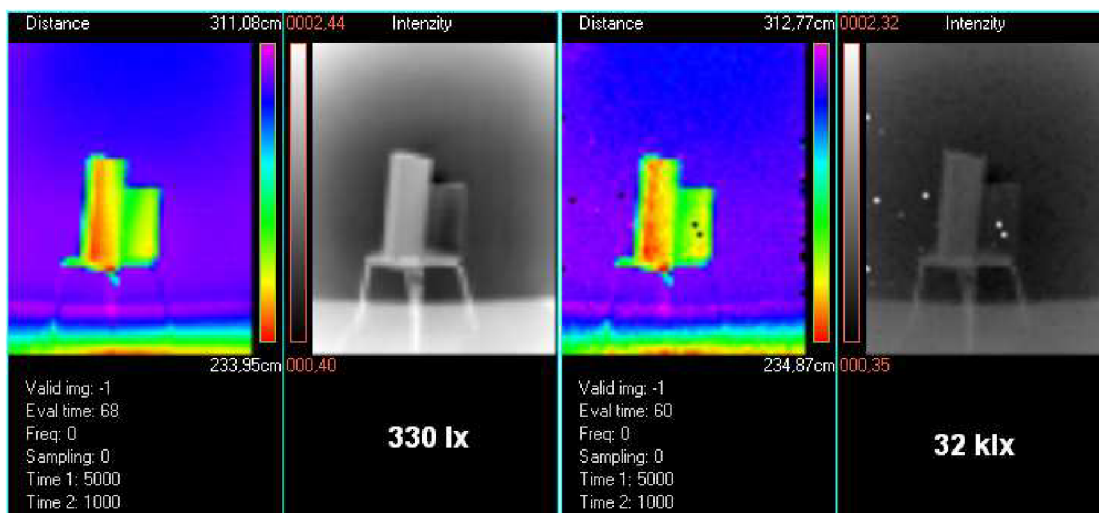
Měřicí scéna je zachycena na Obr. 8.18, vlevo vidíme scénu za normálního osvětlení, vpravo je scéna s přidavným světlem a stínící deskou. Scéna byla změřena třikrát (bez stínící desky) – za tmy (0 lx), za normálního osvětlení (intenzita světla 330 lx) a při nasvícení halogenovým světlem s výkonem 1 kW (intenzita 32 klx). Pro přehlednost přiřadíme jednotlivým situacím indexy – vzdálenost za tmy označme indexem 1, za normálního osvětlení indexem 2 a situace s přisvícením bude mít index 3.

Na Obr. 8.19 je vizualizace naměřených dat pro druhý a třetí případ, první případ je téměř totožný s druhým. Hlavním rozdílem mezi prvním a druhým měřením je výskyt nezměřených bodů v obraze a zvýšení šumu. Počet nezměřených bodů je zanedbatelný (přibližně 15), proto jsme je při další analýze neuvažovali. Na Obr. 8.20 jsou vykresleny řezy řádkem 34 pro případ 1 až 3. Vidíme, že naměřené hodnoty pro první a druhou situaci jsou téměř stejné. Pro třetí se objevil již zmíněný šum. Porovnání celých scén jsme provedli pomocí rozdílových snímků. Výsledky vidíme v pravém dolním rohu Obr. 8.20. Označení *DXY* znamená rozdíl mezi naměřenou vzdáleností pro situaci *X* a *Y*. Můžeme říct, že senzor měří se stejnou přesností za tmy jako při normálním osvětlení. Při situacích, jako je třetí modelová situace, je vlivem světelného šumu absolutní chyba zvýšena na ± 10 až 15 cm. Dále byla stejná scéna změřena se stínící deskou pro situace 2 a 3. Stínící deska se na výsledcích nijak neprojevila.

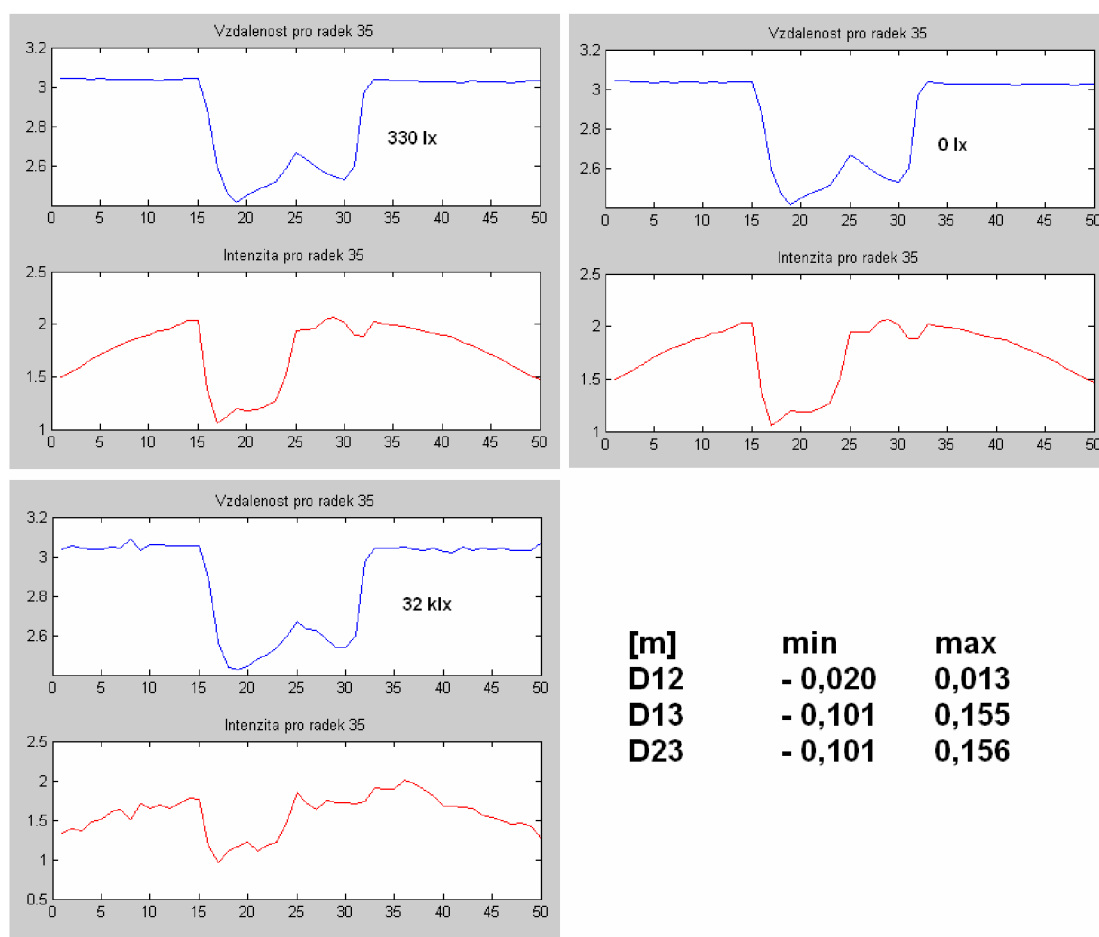
Závěrem experimentu by se dalo říct, že senzor dokáže měřit ve tmě díky vlastnímu zdroji osvětlení a při působení dalšího světelného zdroje z okolí dokáže rozeznávat předměty i když naměřená vzdálenost je se zvýšenou chybou.



Obr. 8.18: Scéna 5: Vliv osvětlení na přesnost senzoru



Obr. 8.19: Scéna 5: Vliv osvětlení - vizualizace

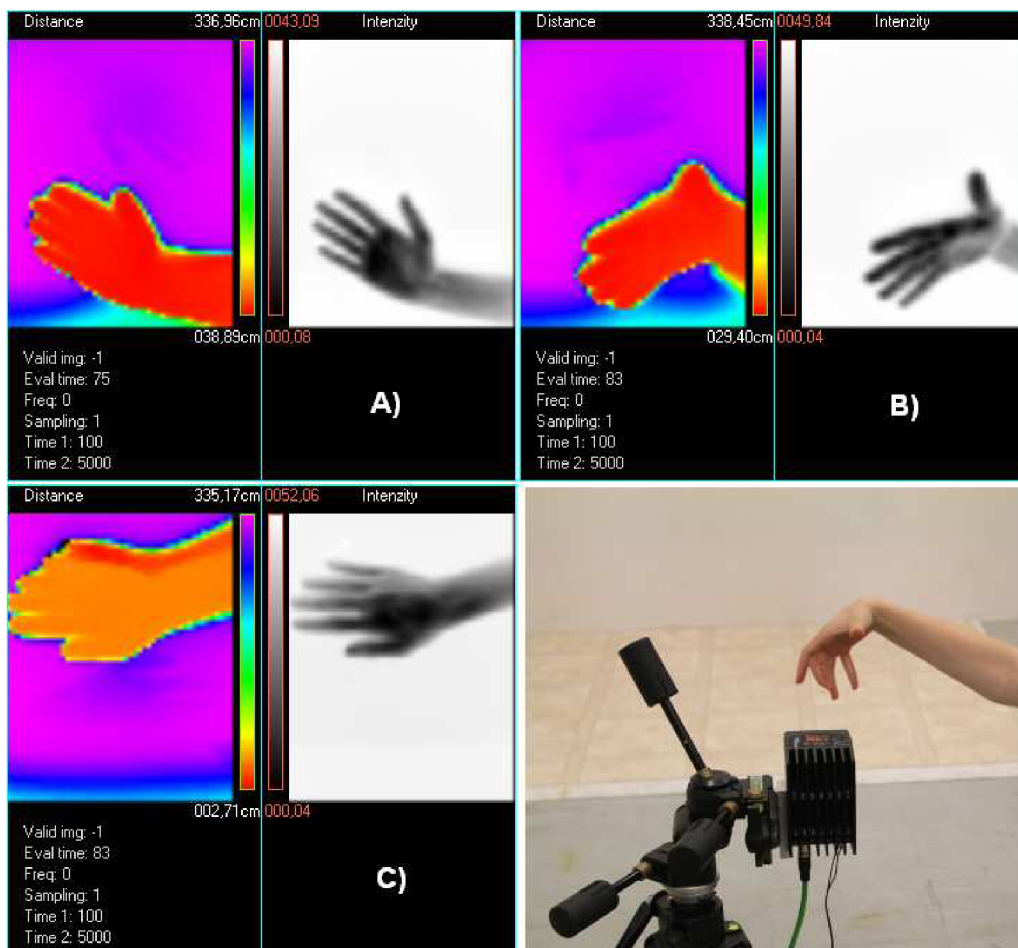


Obr. 8.20: Scéna 5: Vliv osvětlení – v řezu

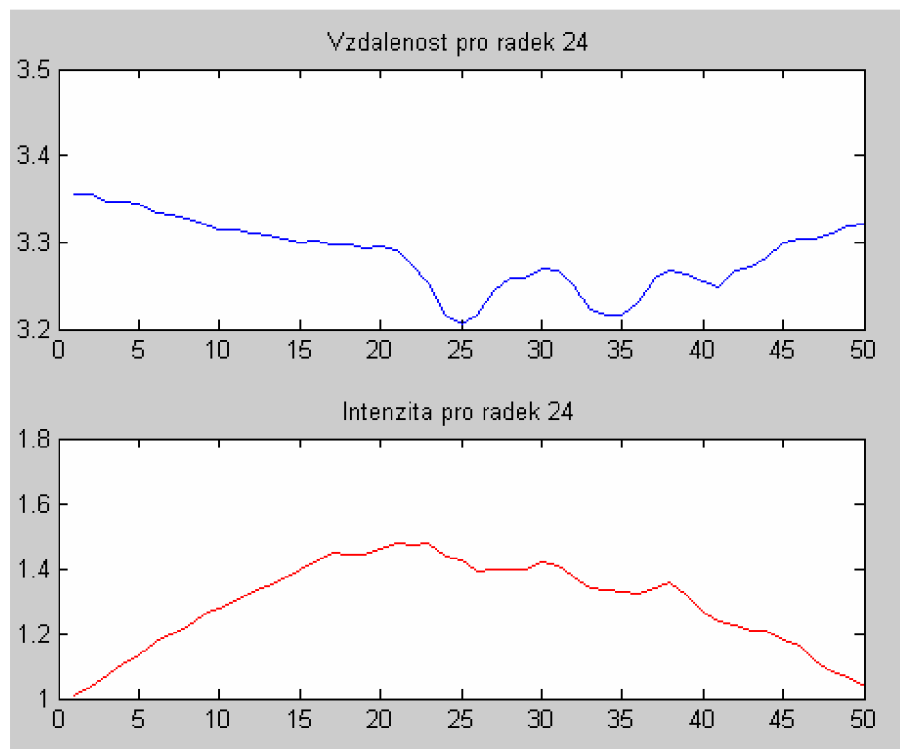
8.6 Další zajímavosti (souměrný odraz, stín v pozadí)

Při experimentování s různými scénami se mi podařilo zachytit zajímavý obraz. Naměřené hodnoty na Obr. 8.21 ukazují scény, kdy senzor je od stěny vzdálen 3,3 m mezi ním a stěnou je ruka (30-40 cm před senzorem). Můžeme si povšimnout, že v horní polovině obrazu A), B) a dolní polovině obrazu C) zobrazené vzdálenosti je jakýsi stín. Při hlubším zkoumání bylo zjištěno, že je to středově souměrné zobrazení detekované ruky. Z řezů na Obr. 8.22 a Obr. 8.23 vyčteme, že rozdíl naměřené vzdálenosti je téměř 10 cm (v intenzitě se projevuje zanedbatelně).

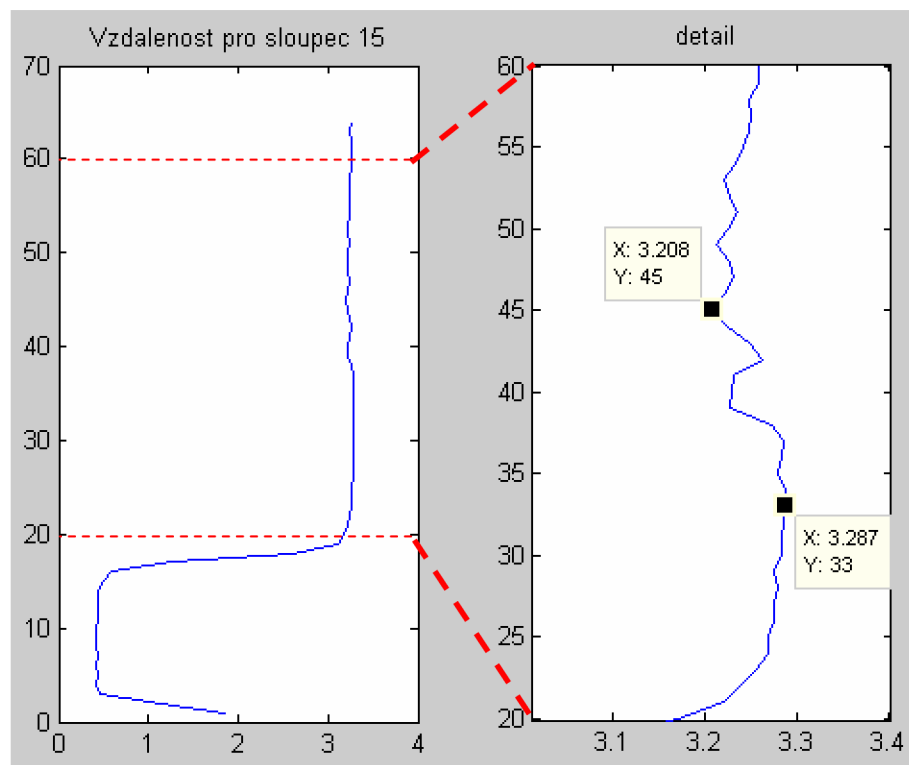
Středově souměrný obraz je chyba senzoru, která je pravděpodobně způsobena fyzickou konstrukcí. Podle mě může být tento efekt způsoben optikou, konkrétně čočkou, která zaostruje dopadající světlo na PMD čip. Pravděpodobně na ní vzniká odraz, který způsobuje středově souměrné otočení obrazu, který se promítne do naměřené vzdálenosti.



Obr. 8.21: Scéna 6: Středově souměrný obraz

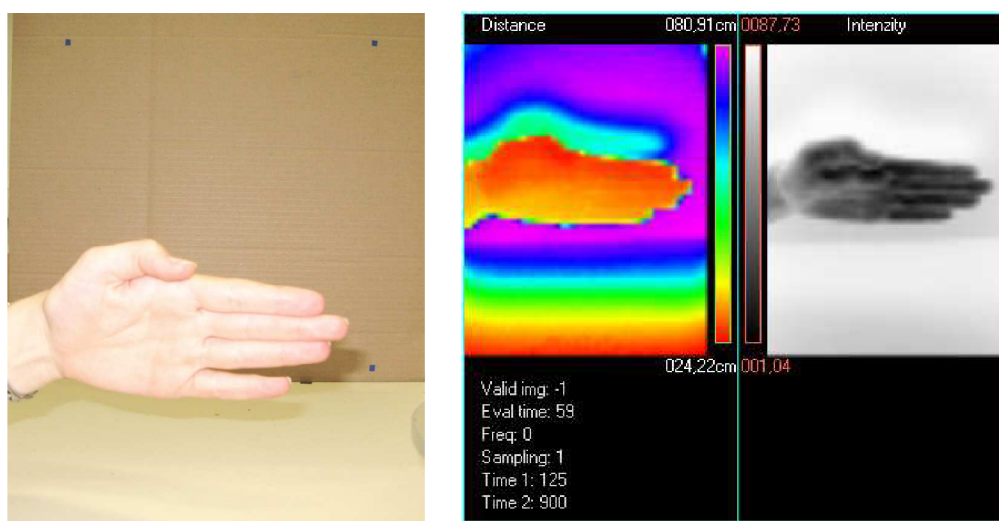


Obr. 8.22: Scéna 6: Středově souměrný obraz A), řez řádkem

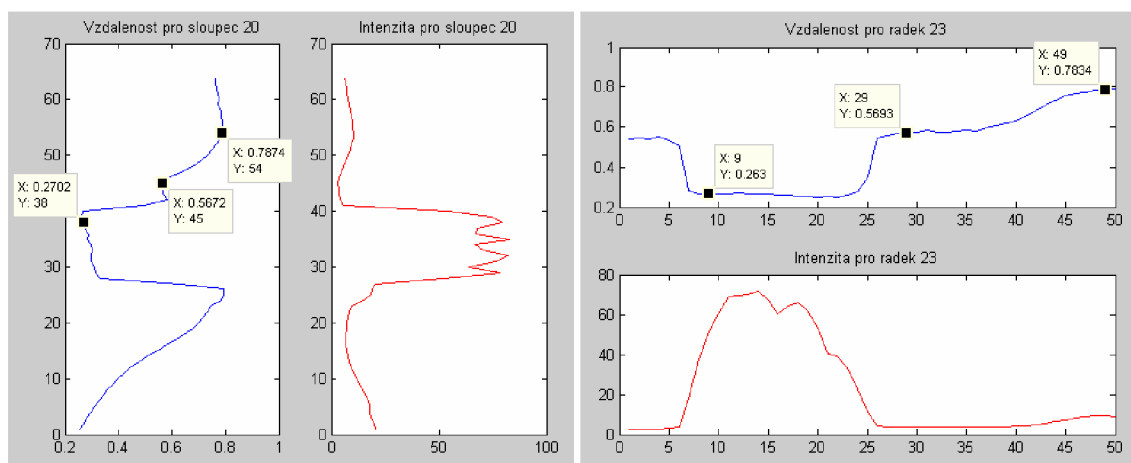


Obr. 8.23: Scéna 6: Středově souměrný obraz A), řez sloupcem

Podobným problémem jako v předchozím experimentu, tedy dvojí detekcí umístěného předmětu, se budeme zabývat i nyní. Tentokrát se nejedná o symetrický obraz, ale o stín způsobený detekovaným objektem. Na Obr. 8.24 – vlevo je zachycena scéna, při které došlo k tomuto jevu. Fiktivní stěna (kartonová deska) je od senzoru vzdálena asi 80 cm, ruka je ve vzdálenosti necelých 30 cm před senzorem. Z vizualizace naměřených dat (Obr. 8.24 – vpravo) vidíme, že za rukou je mylně detekován další předmět, tvarově odpovídající již detekované ruce v popředí. Tento jev se projevil v intenzitě i vzdálenosti. Vznikl pravděpodobně zpětným odrazem od pozadí. Toto by se nestalo, pokud by zdroj světla byl v ose detektoru (zde je detektor umístěn nad světelným zdrojem, proto mohou vznikat detekovatelné stíny).



Obr. 8.24: Scéna 7: Stín za objektem – foto, vizualizace



Obr. 8.25: Scéna 7: Stín za objektem – v řezu

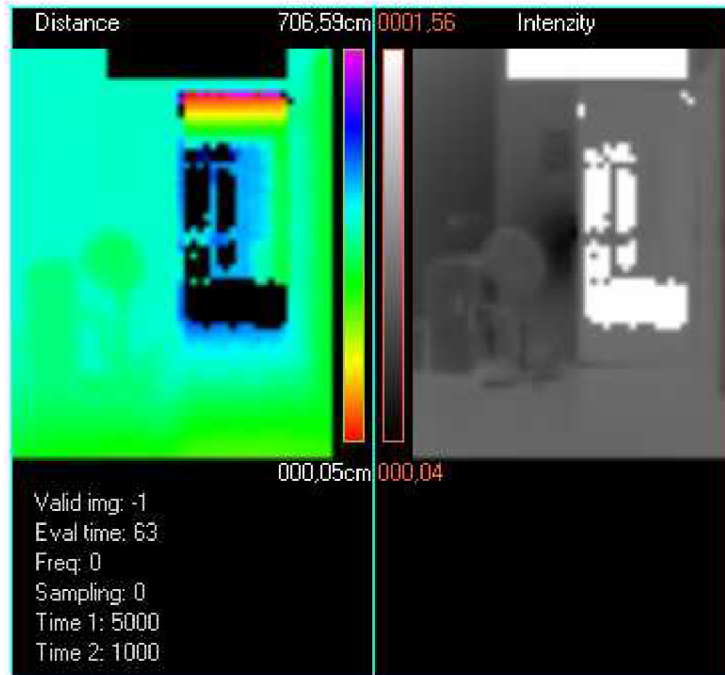
8.7 Ambigvita – nejednoznačnost rozsahu

Z kapitoly 2.1 již známe pojem nejednoznačnost rozsahu (též ambigvita). Víme, že senzor O3D201 ji řeší použitím duální frekvence. V textu je také napsáno, že tento přístup je použit pouze při dvojí integraci. To by znamenalo, že při použití jednoduché integrace se ambigvita projeví. Následující experiment toto tvrzení dokazuje.

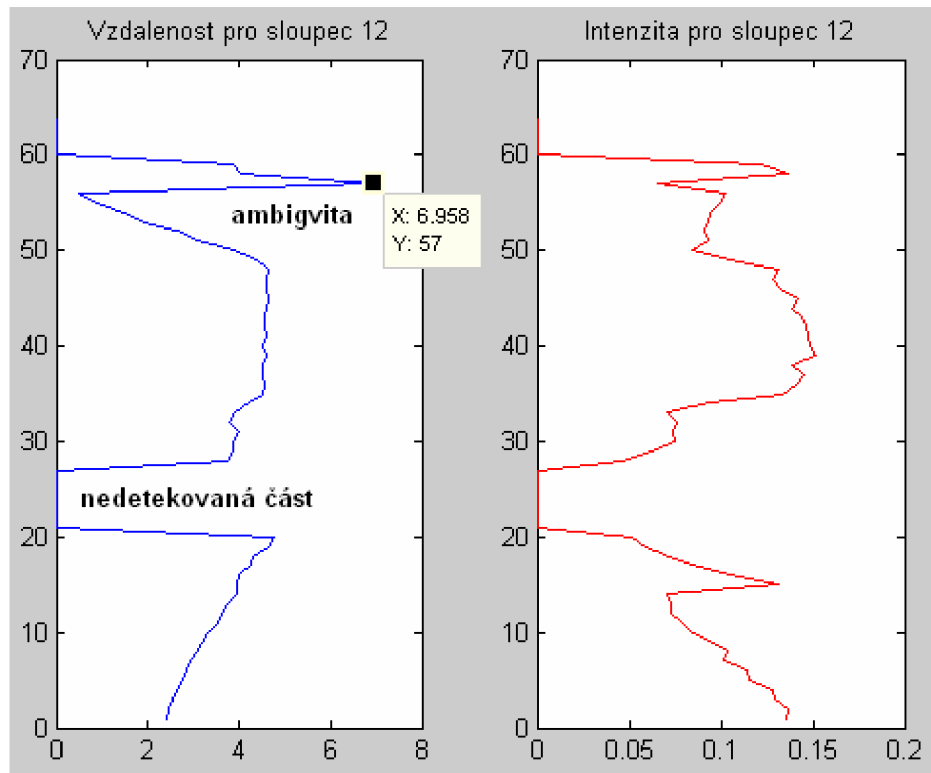
Na Obr. 8.26 je fotografie scény. Vidíme, že je velmi členitá, senzor je v místnosti, kde na podlaze je linoleum, na chodbě za otevřenými dveřmi je dlažba a další dveře vedoucí ven. Část dlažby, skleněné dveře a venkovní prostor senzor nedetekoval, stejně jako černý pás nad prvními dveřmi, neboť se nevrátilo světlo s dostatečnou intenzitou. Obr. 8.27 vizualizuje naměřená data v *O3D_Application*. Z fotografie scény je patrné, že nejbližším detekovaným předmětem by měly být otevřené dveře, z vizualizace je ale vidět, že nejbližší hodnota je detekována až za těmito dveřmi, což je nelogické. Z řezu na Obr. 8.28 je zřejmé, že vzdálenost (uvažován postup zespoda nahoru od 0 do 64) začíná na více než dvou metrech a narůstá, pak následuje oblast, kterou senzor nemohl změřit (podlaha na chodbě). Další úsek má přibližně stejnou vzdálenost (roh s krabicí u zadních prosklených dveří) a pak vzdálenost klesá (strop na chodbě). Zde se nachází zlom způsobený ambigvitou.



Obr. 8.26: Scéna 8: Ambigvita – fotografie



Obr. 8.27: Scéna 8: Ambigvita – foto



Obr. 8.28: Scéna 8: Ambigvita - foto

9 ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo seznámit se s proximitním 3D skenerem společnosti Ifm electronic, GmbH s označením O3D201. Úkolem bylo ověřit jeho činnost a základní vlastnosti, vytvořit program pro měření a vizualizaci dat v reálném čase. Dále umožnit ukládání dat z tohoto programu pro pozdější zpracování a provést následnou analýzu jeho parametrů se zaměřením na parazitní.

Prvním krokem bylo seznámit se s měřicím principem a použitou technologií měření, dále nastudovat možnosti komunikace. Senzor oproti většině ostatních optických snímačů pro měření vzdálenosti, založených na principu TOF (měření doby letu), využívá technologii PMD (Photonic-Mixer-Device), která není příliš rozšířená, přes to, že je známa již od roku 1996. Metoda umožňuje, díky maticovému uspořádání detektorů na 1/2" čip, měřit celou scénu najednou. To je výhodou především pro měření rychlých dynamických scén. Princip této technologie podrobněji popisuje kapitola 2.1. Možnosti komunikace jsou uvedeny v kapitole 2.2 se zaměřením na komunikaci pomocí ethernetu. Nespornou výhodou senzoru je jeho kompaktní průmyslové provedení, s krytím IP67, a fakt, že se jedná o inteligentní senzor v pravém slova smyslu, neboť v jednom pouzdře je umístěn zdroj světla, vlastní měřicí a vyhodnocovací jednotka a v poslední řadě server pro ethernetovou komunikaci.

Nastavení parametrů senzoru je možné několika způsoby, například pomocí tlačítek umístěných pod 10-ti segmentový displej. Tento přístup nedovoluje nastavit všechny parametry ani vizualizaci naměřených dat, proto se používá především komunikace pomocí ethernetu. Po vytvoření XML-RPC klienta, který bude komunikovat se serverem senzoru, je možné nastavovat všechny povolené parametry. Nejdůležitější nastavitelné parametry jsou podrobněji popsány a vysvětleny v kapitole 3. Řadí se mezi ně například měřicí mód, typ integrace, expoziční doby a rychlost měření. Dále je možné nastavit předzpracování dat pomocí filtrace signálu. Funkce, které to umožňují jsou popsány v kapitole 5.1.

Pro další práci se senzorem byl vyvinut program *O3D_Application* (v jazyce C#), který slouží jako uživatelská aplikace umožňující nastavovat měřicí parametry, měřit a vizualizovat data v reálném čase. Program slouží také pro ukládání naměřených dat. Popis uživatelského prostředí, funkce programu a způsobu získávání a ukládání dat je v kapitole 6. Aplikace ukládá naměřená data spolu s nastavenými parametry pro možnou opakovatelnost, ale především pro účely analýzy. Data jsou ukládána ve speciálním formátu, který je potřebný pro druhý vytvořený program *OpenFiles* (v Matlabu). Ten slouží pro pozdější zpracování naměřených dat. Věnuje se mu kapitola 7, kromě vizualizace vzdálenosti a intenzity dokáže měřit hodnoty v bodech zadaných uživatelem a zobrazit řez obrazu.

Pomocí těchto dvou aplikací bylo senzorem naměřeno a později zpracováno mnoho různých scén. Díky tomu toho můžeme o senzoru říct nyní mnohem více. Například experimentem z kapitoly 8.1 bylo zjištěno, že přesnost senzoru se pohybuje řádově v centimetrech – průměrná absolutní chyba vyšla ± 3 cm (měřeno pro rozsah vzdálenosti

0,5-3,5 m detekovaný objekt kartonová deska). Výrazný vliv na přesnost má materiál detekovaného objektu, případně úhel natočení vůči ose senzoru, jak dokumentuje jiný experiment (kapitola 8.3). Tzv. měkké materiály mají velký útlum a proto je senzor detekuje ve větší vzdálenosti než ve skutečnosti jsou, například černý molitan senzor detekoval s chybou více než 14 cm. Špatně detekovatelné jsou i příliš reflektivní materiály pokud nejsou kolmo k ose senzoru (např. linoleum). Graf výsledné absolutní chyby pro měřené materiály s různým natočením je na Obr. 8.5. Nejlepších výsledků dosahuje hobra (dřevovláknitá deska), protože má dobrou reflektivitu a struktura materiálu zajišťuje odraz i při jiném úhlu natočení.

Pro správnou detekci scény jsou nejdůležitějšími parametry expoziční doby a volba integrace. Tyto parametry jsou popsány v kapitole 3.1. Při volbě jednoduché nebo dvojí integrace je třeba si uvědomit jaká bude maximální vzdálenost, která se má měřit. Pokud není scéna rozměrově omezená (maximální vzdálenost není stanovena), musí se použít dvojí integrace, aby se zamezilo vzniku ambigvity (nejednoznačnosti rozsahu). Jednoduchou integraci lze použít pouze v případě, že ve scéně je zaručena maximální vzdálenost menší než je dosah daný zvolenou modulační frekvencí. Špatné použití (vznik ambigvity) demonstruje experiment popsáný v kapitole 8.7.

Ke zvláštním efektům došlo při experimentech, kterými se zabývá kapitola 8.6. V prvním případě se objevil ve scéně středově symetrický obraz předloženého předmětu (v tomto případě ruky – viz Obr. 8.21). Chyba se projevila v naměřené vzdálenosti a méně patrně i v intenzitě. Středově souměrný fiktivní objekt je pravděpodobně způsoben odrazem světla v optice senzoru – na čočce zaostřující světlo na PMD čip. Druhý případ má v detekované scéně také fiktivní předmět, tentokrát stejně orientovaný – Obr. 8.24. Tento jev je patrně způsoben odrazem od pozadí scény. Tyto nežádoucí efekty by se nejspíš daly ovlivnit úpravou expoziční doby – přesněji jejím zkrácením.

Posledním zkoumaným parametrem byl vliv okolního světla na přesnost měření (kapitola 8.5). Výsledky ukazují, že senzor je schopen bez problémů měřit ve tmě a při normálním osvětlení (intenzita 330 lx). Při nasvícení scény halogenem o výkonu 1kW se nepřesnost zvýšila na 10 cm (intenzita světla ve scéně byla 32 klx). Pro podrobnější zjištění závislosti přesnosti na intenzitě světla by bylo potřeba mít k dispozici světelná zdroj s nastavitelným výkonem.

Nynější verze uživatelské aplikace *O3D_Application* byla zaměřena především na zkoumání vlastností samotného senzoru a jeho parazitních parametrů. Pro použití v mobilní robotice by bylo vhodné ji upravit tak, aby případná obsluha nemusela měnit parametry ručně, ale aby se například expoziční doby nastavovaly automaticky. S takovouto modifikací by se dal senzor použít i pro autonomní roboty.

Literatura

- [1] Hokuyo Automation Co.,Ltd. *URG-04LX_spec*. říjen 2005.
http://www.hokuyo-aut.jp/02sensor/07scanner/download/data/URG-04LX_spec.pdf
- [2] Ifm electronic GmbH. *O3D2xx_Programmers_Guide*. Verze 1.1 (27.3.2009)
- [3] Ifm electronic GmbH. *O3D2xx_Programmers_Guide*. Verze 1.3 (2.5.2011)
- [4] Ifm electronic GmbH, *Technická specifikace senzoru O3D201*. prosinec 2009
<http://www.ifm.com/ifmcz/web/dsfs!O3D201.html>
- [5] Ifm electronic GmbH, Technologie PMD <http://www.ifm-electronic.com/ifmcz/web/pmd.htm>
- [6] KLOS Oldřich, *Nové přístroje pro detekci prostoru vyvinuté na bázi technologie pmd*. Automatizace. říjen 2009.
<http://www.automatizace.cz/article.php?a=2625>
- [7] PMD Technologies GmbH. *A 3D time of flight camera for object detection*. [online].
http://www.pmdtec.com/fileadmin/pmdtec/downloads/publications/200705_PMD_ETHZuerich.pdf 2009. (12.1.2011)
- [8] KOPECKÝ Martin, *CookComputing.XmlRpcV2.dll*. [soubor] VUT Brno, 2010
- [9] KOPECKÝ Martin. *IFM_PMD3D.dll*. [soubor] VUT Brno, 2010
- [10] BURIAN F., KOPECKÝ M. *ScannerPMD3d.cs*. [soubor] VUT Brno, 2011
- [11] BURIAN František. *Scanner.cs*. [soubor] VUT Brno, 2011
- [12] BURIAN František. *Scanner.cd*. [soubor] VUT Brno, 2011
- [13] SICK, spol. s. r. o., *LMS100_product information.pdf*. duben 2008
http://www.sick-automation.ru/images/File/pdf/DIV05/LMS100_product%20information.pdf
- [14] SICK, spol. s.r.o., *LD-MRS_manual*, červenec 2009. http://www.sick-automation.ru/images/File/pdf/DIV05/LD-MRS_manual.pdf

Použité zkratky

TOF	Time-of-Flight; měření doby letu
PMD	Photonic-Mixer-Device; měřicí technologie
XML-RPC	eXtensible Markup Language – Remote Procedure Call; protokol využívající vzdáleného volání procedur
TCP/IP	Transmission Control Protocol/Internet Protocol; sada protokolů pro komunikaci v počítačové síti
Ifm time	Inter Frame Mute Time; softwarově nastavitelný interní čas
HSV	Hue, Saturation, Value; barevný model
ÚAMT	Ústav automatizace a měřicí techniky
FEKT	Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
VUT	Vysoké učení technické v Brně

Seznam příloh

Příloha 1: CD/DVD: Matlab – složka obsahující zdrojové kódy *OpenFiles.m*,
Rozdilove_snimky.m, *ViewImg.m*
Měření – složka obsahující všechnu dokumentaci k měřením
O3D201_Application_V1 – uživatelská aplikace
DP_Mlatecova Hana.doc – vlastní text diplomové práce
DP_Mlatecova Hana.pdf – vlastní text diplomové práce