



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA BIOMEDICÍNSKÉHO INŽENÝRSTVÍ

Katedra biomedicínské techniky

3D skenování během operačních výkonů

3D scanning during surgical procedures

Bakalářská práce

Studijní program: Biomedicínská a klinická technika

Studijní obor: Biomedicínský technik

Vedoucí práce: doc. Ing. Jiří Hozman, Ph.D.

Matyáš Korba

Kladno 2022

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Korba** Jméno: **Matyáš** Osobní číslo: **492253**
Fakulta: **Fakulta biomedicínského inženýrství**
Garantující katedra: **Katedra biomedicínské techniky**
Studijní program: **Biomedicínská a klinická technika**
Studijní obor: **Biomedicínský technik**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

3D skenování během operačních výkonů

Název bakalářské práce anglicky:

3D scanning during surgical procedures

Pokyny pro vypracování:

Navrhněte a realizujte pilotní experimenty v oblasti 3D skenování během operace děložního hrdla s využitím fantomu, který bude využívat různé materiály včetně živočišných výrobků z masa a gynekologické zrcadlo. Cílem je získat věrný 3D model děložního hrdla (čípku) před operací a případně i po operaci. Pro experimenty použijte modul se senzorem Lidar a modul ToF. Pro zpracování signálu použijte minipočítač Raspberry Pi. Proveďte detailní analýzu rozlišovací schopnosti a dále optimalizujte zpracování signálu s cílem dosáhnout co možná nejmenší snímací vzdálenost.

Seznam doporučené literatury:

- [1] McManamon, Paul F., LiDAR technologies and systems, Bellingham, Washington, USA : SPIE Press, 2019, eknih dostupná v EIZ, https://aleph.cvut.cz/F?func=direct&doc_number=000821821&local_base=DUPL&format=999
- [2] Horaud, R., Hansard, M., Evangelidis, G. et al., An overview of depth cameras and range scanners based on time-of-flight technologies, Machine Vision and Applications, ročník 27, číslo 7, 2016, Říjen, 1005-1020 s., <https://doi.org/10.1007/s00138-016-0784-4>
- [3] Nguyen, T.T., Cheng, C.H., Liu, D.G., Le, M.H., Improvement of Accuracy and Precision of the LiDAR System Working in High Background Light Conditions, Electronics, ročník 11, číslo 1, 2022, Prosinec, 1-18 s., <https://doi.org/10.3390/electronics11010045>
- [4] Tachella, J., Altmann, Y., Mellado, N. et al., Real-time 3D reconstruction from single-photon lidar data using plug-and-play point cloud denoisers, Nat Commun, ročník 10, číslo 4984, 2019, Listopad, <https://doi.org/10.1038/s41467-019-12943-7>

Jméno a příjmení vedoucí(ho) bakalářské práce:

doc. Ing. Jiří Hozman, Ph.D.

Jméno a příjmení konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **14.02.2022**

Platnost zadání bakalářské práce: **18.09.2022**

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem „3D skenování během operačních výkonů“ vypracoval samostatně a použil k tomu úplný výčet citací použitých pramenů, které uvádím v seznamu přiloženém k bakalářské práci.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů.

V Kladně dne 12.5.2022

.....

Matyáš Korba

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval svému vedoucímu doc. Ing. Jiřímu Hozmanovi, Ph.D za vstřícnost, cenné rady a konzultace při vypracování této bakalářské práce

ABSTRAKT

3D skenování během operačních výkonů:

Cílem práce bylo získat věrný 3D model před a případně i po operaci děložního hrdla s využitím fantomu. Hlavní motivací byl návrh na levnou a dostupnou alternativu k nyní běžně používaným metodám využívajícím CT a MRI pro lékaře při operacích. Tato práce se krátce zabývá přehledem typů skenerů, úvodem do problematiky karcinomu děložního hrdla a v hlavní části mapuje pilotní experimenty skenování senzorem Lidar a ToF. Výstupem jsou snímky z těchto 3D skenerů. Bylo však zjištěno, že kvůli svým špatným technickým parametrům nejsou schopny přesně nasnímat tak malé a složité prostředí jako děložní hrdlo. Tato práce může sloužit jako podklad pro další řešení této problematiky .

Klíčová slova

3D skenování, děložní hrdlo, ToF, Lidar, 3D skener

ABSTRACT

3D scanning during surgical procedures:

The project's main aim was to obtain a faithful 3D model, which would represent the state of the cervix before and after the surgery using the phantom. The crucial aspect of motivation is designing a cheap and unique alternative to the commonly used operation methods such as CT and MRI. The thesis briefly deals with the overview of the types of scanners, provides an introduction to the issue of cervical cancer, and the main part is dedicated to the pilot experiments of scanning the cervix by the Lidar and ToF scanners. The scanners provide 3D images of the cervix. However, it was found that due to their technical parameters, the scanners cannot reach such precise and complex images of environments as the cervix. The thesis opens the possibilities for further solution of the scanner usage in cervix surgery.

Keywords

3D scanning, cervix, ToF, Lidar, 3D scanner

Obsah

Seznam symbolů a zkratk	8
Seznam obrázků	9
1 Úvod	12
2 Přehled současného stavu	13
2.1 3D skenování.....	13
2.2 3D skenování ve zdravotnictví.....	14
2.3 Děložní hrdlo a karcinom děložního čípku	14
2.4 Odstranění karcinomu a vyhodnocování odebrané tkáně	16
3 Cíle práce	17
4 Metody	18
4.1 Skenování pomocí senzorů ToF a Lidar	18
4.1.1 Senzor ToF	18
4.1.2 Senzor Lidar	19
4.1.3 Raspberry Pi	20
4.1.4 Pohyb senzorů	22
4.1.5 Princip snímání a zpracování dat.....	23
4.2 Lidar obsažen v zařízeních Apple	25
4.3 Fantomy a samotné měření	27
5 Výsledky	32
6 Diskuse	45
7 Závěr	48
Seznam použité literatury	49
Příloha A: Kód pro získávání dat – senzor ToF	51
Příloha B: Kód pro získávání dat – senzor Lidar	52
Příloha C: Kód pro úpravu dat	54
Příloha D: Výkresy šachovnicových modelů	56
Příloha E: Skeny ze senzoru ToF	59

Seznam symbolů a zkratek

Seznam symbolů

Symbol	Jednotka	Význam
d	cm	Vzdálenost
t	s	Čas
φ	°	Fázový posun
c	m/s	Rychlost světla
f	Hz	Frekvence
r	cm	poloměr
α, θ	°	Úhel

Seznam zkratek

Zkratka	Význam
HPV	Human papillomavirus
CT	Computed tomography
MRI	Magnetic resonance imaging
LEEP	Loop electrosurgical excisional procedure
NETZ	Needle Excision of the Transformation Zone
US	Ultrasound
ToF	Time of flight
Lidar	Light Detection and Ranging
SDA	Synchronous Data
SCL	Synchronous Clock
TXD	Transmit data
RXD	Receive data

Seznam obrázků

Obrázek 2.1: Podrobné dělení 3D skenerů [2].....	13
Obrázek 2.2: Popis děložního hrdla (pohlavního orgánu ženy) [12]	15
Obrázek 4.1: Senzor VL53L1X	19
Obrázek 4.2: A) Senzor TFMini-S B) Senzor TFMini-S se clonkou pro zúžení vysílaného paprsku.....	20
Obrázek 4.3: Raspberry Pi 4 B s periferiemi (klávesnice, obrazovka a myš)	21
Obrázek 4.4: Popis Raspberry Pi 4 B [29].....	21
Obrázek 4.5: Sestava senzoru TFMini-S, servo motorů a jejich držáku	22
Obrázek 4.6: Blokové schéma kódu pro snímání senzorem	23
Obrázek 4.7: Blokové schéma úpravy dat v programovém prostředí Matlab	24
Obrázek 4.8: Sférické souřadnice [31]	25
Obrázek 4.9: Senzor Lidar na přístrojích firmy Apple [35]	26
Obrázek 4.10: Snímání modelu pomocí iPadu Pro v aplikaci 3D Scanner app.....	26
Obrázek 4.11 A,B,C: Různé typy polystyrenu použité při zkoušce skenování	27
Obrázek 4.12: Schématický náčrt pro modely z různého materiálu (náčrt je uveden v mm).....	27
Obrázek 4.13: A) dřevěný model B) plastový model C) molitanový model D) polystyrenový model	28
Obrázek 4.14: Schématický náčrt pro „šachovnici" o délce hrany 1 cm (náčrt je uveden v mm)	29
Obrázek 4.15: Plastové fantomy „šachovnice" o délkách hran krychlý A) 0,5 cm B) 1 cm C) 2 cm.....	29
Obrázek 4.16: Gynekologická zrcadla.....	29
Obrázek 4.17: Molitanový fantom s gynekologickým zrcadlem	30
Obrázek 4.18: Celá měřicí soustava s molitanovým fantomem	30
Obrázek 4.19: Simulovaný děložní čípek z profilu	31
Obrázek 4.20: Masový fantom s gynekologickým zrcadlem	31
Obrázek 4.21: Skenování masového fantomu senzorem ToF	31
Obrázek 5.1: Sken plastového modelu - senzor ToF (řez)	33
Obrázek 5.2: Sken plastového modelu - senzor Lidar (řez)	33

Obrázek 5.3: Porovnání skenu ze senzoru ToF s plastovým modelem A) boční pohled B) horní pohled C) výřez děložního čípku.....	34
Obrázek 5.4: Porovnání skenu ze senzoru Lidar s plastovým modelem A) boční pohled B) horní pohled C) výřez děložního čípku.....	35
Obrázek 5.5: Sken dřevěného modelu - senzor ToF (řez)	35
Obrázek 5.6: Sken dřevěného modelu - senzor Lidar (řez)	35
Obrázek 5.7: Porovnání skenu ze senzoru Lidar s dřevěným modelem A) boční pohled B) horní pohled C) výřez děložního čípku	36
Obrázek 5.8: Sken polystyrenového modelu - senzor ToF (řez)	36
Obrázek 5.9: Sken polystyrenového modelu - senzor ToF (řez)	36
Obrázek 5.10: Porovnání skenu ze senzoru Lidar s polystyrenovým modelem A) boční pohled B) horní pohled C) výřez děložního čípku	37
Obrázek 5.11: Sken molitanového modelu - senzor ToF (řez).....	37
Obrázek 5.12: Sken molitanového modelu - senzor Lidar (řez).....	37
Obrázek 5.13: Porovnání skenu ze senzoru Lidar s molitanovým modelem A) boční pohled B) horní pohled C) výřez děložního čípku.....	38
Obrázek 5.14: Sken šachovnicového modelu o délce hrany 0,5 cm senzorem ToF A) shora B) boční pohled.....	39
Obrázek 5.15: Sken šachovnicového modelu o délce hrany 1 cm senzorem ToF A) shora B) boční pohled	39
Obrázek 5.16: Sken šachovnicového modelu o délce hrany 2 cm senzorem ToF A) shora B) boční pohled.....	39
Obrázek 5.17: Sken šachovnicového modelu o délce hrany 0,5 cm senzorem Lidar A) shora B) boční pohled	40
Obrázek 5.18: Sken šachovnicového modelu o délce hrany 1 cm senzorem Lidar A) shora B) boční pohled.....	40
Obrázek 5.19: Sken šachovnicového modelu o délce hrany 1 cm senzorem Lidar A) shora B) boční pohled.....	40
Obrázek 5.20: Sken molitanového fantomu děložního hrdla senzorem ToF (řez).....	41
Obrázek 5.21: Sken molitanového fantomu děložního hrdla senzorem Lidar (řez).....	41
Obrázek 5.22: Sken masového modelu děložního hrdla senzorem ToF z různých úhlů	42
Obrázek 5.23: Sken masového fantomu děložního hrdla senzorem ToF (řez).....	42

Obrázek 5.24: Sken masového modelu děložního hrdla senzorem Lidar z různých úhlů	43
Obrázek 5.25: Sken masového fantomu děložního hrdla senzorem Lidar (řez).....	43
Obrázek 5.26: Porovnání skenu ze senzoru Lidar se senzorem obsaženým v přístrojích Apple.....	44

1 Úvod

Karcinom děložního hrdla je třetí nejčastější onkologické onemocnění u žen a každým rokem je v České republice diagnostikováno přibližně 800 nových případů, z čehož každý den jedna žena v důsledku onemocnění zemře [1]. Tento počet je v mezinárodním srovnání velmi vysoký, a proto je důležité se touto problematikou neustále zabývat a zlepšovat již zavedené postupy. Velmi málo žen si připouští, že by se mohlo nakazit virem HPV, který je přímo zodpovědný za vznik karcinomu. Jelikož jsou časná stadia karcinomu děložního čípku bezpříznaková, je nejlepší obranou proti nemoci včasná a dostatečná prevence. Avšak jen malé množství žen využívá dostupné možnosti jako je každoroční preventivní prohlídka nebo očkování.

Včasná diagnóza a dostupnější způsoby skenování při operacích mohou vést k vyšší úspěšnosti provedených konizací. Konizace, tedy odstranění postižené tkáně z děložního čípku, je ve většině případů hlavní metoda léčby karcinomu, a to společně s radioterapií nebo chemoterapií. U dobře provedené konizace se hledá kompromis mezi množstvím odebrané tkáně z děložního čípku tak, aby bylo odebráno co nejmenší možné množství, ale nedocházelo k dalšímu tvoření karcinogenních buněk. Množství konizátu hraje přímou roli v budoucím zdravotním stavu pacientky, například může způsobovat neplodnost, předčasný porod nebo potrat plodu.

Bakalářská práce se zabývá možností 3D skenování děložního hrdla pomocí metod využívajících principu založeném na odrazu světla. Díky skenu před a po operaci by mohlo být jednoduše a v krátkém čase bez zbytečného zatížení pacientky ionizujícím zářením odečteno množství odebrané tkáně. Cílem je určit, zda se tato metoda hodí k výše zmíněnému účelu a přispěla by tak k vyšší úspěšnosti operací karcinomu děložního čípku.

2 Přehled současného stavu

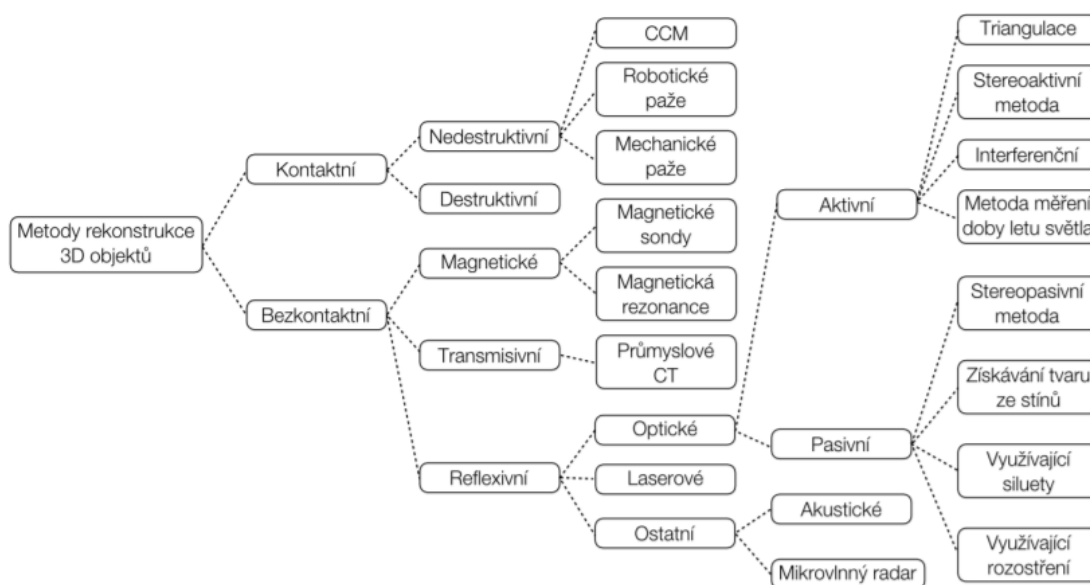
2.1 3D skenování

3D skenery jsou přístroje, které slouží k přenosu reálných tvarů a textur do digitálního prostředí, kde může docházet k dalšímu zpracování a zobrazování. Skenery pracují na principu snímání bodů objektu v bodové síti. Tato síť je propojena pomocí interpolace, a tím vzniká trojrozměrný model snímaného objektu. [2, 3, 4]

3D skenery dělíme na kontaktní a bezkontaktní. Během kontaktního (dotykového) snímání je využívána sonda citlivá na tlak. Tato sonda kopíruje tvar objektu a její pozice je zaznamenávána. Výhodou této metody je možnost bezproblémového snímání průhledných nebo lesklých materiálů, se kterým mohou mít některé bezkontaktní skenery problém. [2, 3, 4]

U bezkontaktních skenerů, jak vyplývá z názvu, nedochází k přímému dotyku skeneru s objektem. Bezkontaktní přístroje dělíme ještě dle principu fungování. Jedno z možných dělení je na magnetické (např. magnetická rezonance), transmisivní (např. CT) a reflexivní (např. optické, akustické). Poslední zmíněná podskupina je v běžném provozu asi nejvíce využívána díky jednoduchosti a přesnosti měření. [2, 3, 4, 5]

Na obrázku 2.1 můžeme vidět podrobnější dělení 3D skenerů



Obrázek 2.1: Podrobné dělení 3D skenerů [2]

2.2 3D skenování ve zdravotnictví

Pro určení správné diagnózy a následnou péči o pacienta je ve zdravotnictví potřeba mít co nejpřesnější a nejvěrnější zobrazení. Proto se také velmi často objevuje 3D zobrazování a s ním spojené 3D skenování, které nachází ve zdravotnictví stále větší uplatnění.

Pro lékaře má 3D skenování největší přínos v přesném zobrazení vnitřních struktur jako je tomu například u CT a magnetické rezonance. Díky těmto zobrazením si lékař může lépe naplánovat průběh vyšetření nebo operace, a tím zrychlit a zkvalitnit zákrok.[6] Bez těchto dvou přístrojů by v dnešní moderní medicíně šlo jen stěží provádět některé zákroky, například v onkologii jsou tyto metody hojně využívány pro přesné zaměření nádorů.

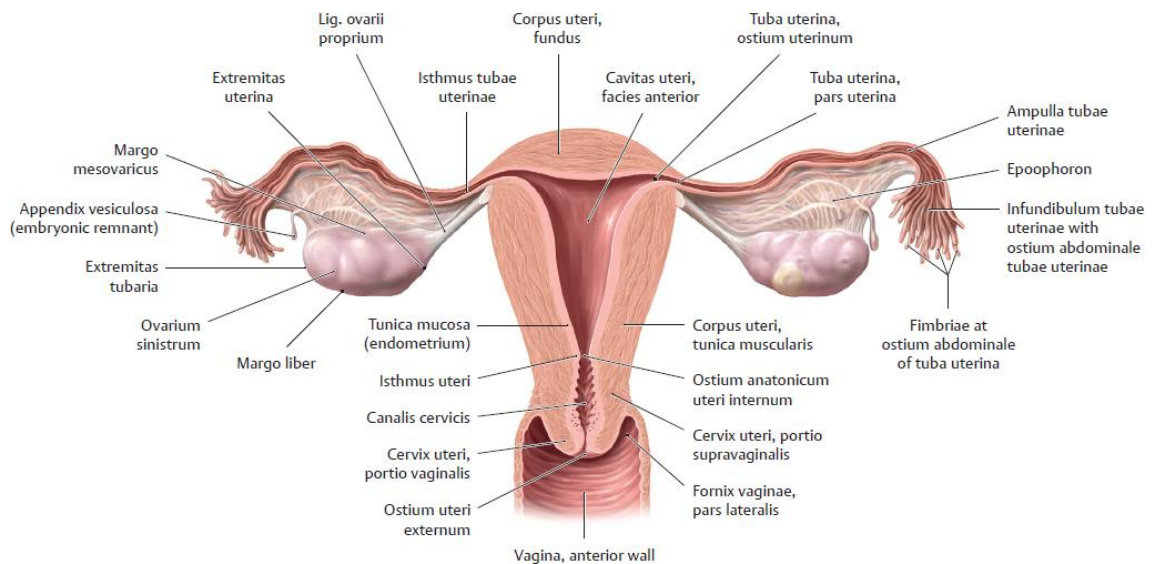
Široce je 3D skenování využito v protetice a ortotice neboli medicínském oboru, který se zabývá tvorbou umělých náhrad nebo pomůcek, které mohou minimalizovat traumata, podpořit proces terapie a usnadnit návrat k běžným aktivitám postiženého. Standardní výroba probíhá pomocí sádrových odlitků pahýlů. Na sádrový model pacienta se poté vytváří potřebné protézy nebo ortézy. Při využití 3D snímání se celý proces urychlí a zpříjemní. Většinou se využívá optické snímání, kdy dochází ke snímání objektu kamerou, která snímá odražené světlo. Při tvoření obličejových náhrad se taktéž využívala sádra, která však mohla zatěžkavat měkkou tkáň, což mohlo vést k deformování obtiskované části a s tím spojeným nepřesnostem modelu. Také bylo nutné, aby pacient měl při obtisku zavřené oči, čímž docházelo k zatínání obličejových svalů a k malým nepřesnostem. Pokud by se navíc jednalo o celo obličejový odlitek je potřeba pacientovi zajistit přísun vzduchu. [6, 7, 8]

Velká část zdravotnictví využívá skenování pomocí ultrazvuku. Kdy mechanické vlnění putuje od zdroje k objektu, kde se na akusticko-impedančních rozhraní odrazí zpět. Ze znalosti času jednotlivých odrazů lze následně vytvořit obraz. Většinou se využívá pouze pro 2D snímání, ale postupem času byl doplněn další rozměr u tzv. 4D ultrazvuků, které zobrazují plnou 3D strukturu. Toto skenování je využíváno hlavně v neonatální medicíně pro zobrazování plodu, ze kterého lze zjistit různé deformační poruchy. Další využití nachází ultrazvuk při navigaci u operací, kde lze nasnímat 2D snímky v různých osách, a tak vznikne 3D obraz. Operátor následně sleduje pomocí UZV pohyb nástroje, což pomáhá při přesném zacílení.[9]

2.3 Děložní hrdlo a karcinom děložního čípku

Děložní hrdlo (lat. cervix uteri) je nejspodnější zúžená část dělohy a tvoří tak propojení mezi dělohou a pochvou. Tvoří uzávěr dělohy, což zamezuje předčasnému porodu či slouží jako ochrana před různými organismy. Měří 3 - 3,5 cm a 2,5 cm průměru. Dělí se na horní úsek děložního hrdla (lat. portio supravaginalis cervicis uteri) a děložní čípek (lat. portio vaginalis cervicis). Horní část děložního hrdla je jen těžko přístupná

při gynekologickém vyšetření. Snadno přístupný je děložní čípek, který vyčnívá do pochvy. Děložní čípek je pokryt vrstevnatým dlaždicovým epitelem, nazývaným ektocervix či exocervix. Děložním hrdlem probíhá kanál děložního hrdla (lat. canalis cervicis uteri). Na straně dělohy tento kanál začíná vnitřní děložní brankou (lat. ostium uteri internum) a ústí do pochvy, kde je zakončen zevní děložní brankou (lat. ostium uteri externum). [10, 11] Popis je vidět také na obrázku číslo 2.2.



Obrázek 2.2: Popis děložního hrdla (pohlavního orgánu ženy) [12]

Karcinom děložního hrdla je způsoben dlouhodobým působením pohlavně přenosného viru HPV (Human papillomavirus), který může být podpořen dalšími faktory jako např. časnost prvního pohlavního styku, promiskuita, kouření a poruchy imunity. Tento virus je běžně vyskytující se a existuje přes 100 HPV typů virů. Většina z nich je neškodná. Mezi méně rizikové onemocnění patří genitální bradavice nebo papilomatóza hrtanu. Nejrizikovějšími typy jsou typ 16 a 18, které patří mezi skupinu cca 14 rizikových typů. Tato skupina způsobuje především změny na epitelu tzv. prekancerózy, které mohou přejít ke karcinomu děložního čípku. Tyto změny jsou bezpříznakové a jsou odhaleny až při vyšetření gynekologem. [13, 14, 15]

K odhalení nemoci se využívá cytologický stěr, který provádí gynekolog při pravidelné každoroční prohlídce. Pokud dojde k nálezům již změněných buněk, provede se gynekologické vyšetření pomocí kolposkopu (přístroj umožňující zvětšení a osvětlení při vyšetřování epitelu), popřípadě se provede biopsie. Prevencí jsou pravidelné kontroly a očkování, které chrání před nejagresivnějšími typy virů. [13]

2.4 Odstranění karcinomu a vyhodnocování odebrané tkáně

K odstranění karcinomu děložního hrdla lze využít dvě metody, a to ablační a excizní. Ablací metoda má za cíl zničit samotný nádor uvnitř těla. Toho lze dosáhnout prudkým schlazením tkáně na nízké hodnoty, takzvanou kryoterapií. Opakem kryoterapie je radikální diatermokoagulace, kdy je tkáň naopak zahřáta na velmi vysoké teploty. Poslední možností ablační metody je laserová vaporizace. Zde dochází k opařování tkáně pomocí laseru. [16, 17, 18, 19]

Častěji používaná metoda je excizní, kde dochází k vyjmutí napadené tkáně z těla ven. Excizní metody jsou označovány jako konizace a mezi velké výhody patří možnost následného vyšetření odebrané tkáně. Řadíme k nim loop electrosurgical excisional procedure (LEEP), jehlovou konizaci (NETZ), cold knife konizaci a laserovou konizaci.

LEEP a NETZ metoda odstraňuje tkáň pomocí elektrochirurgických kliček respektive jehly. Kličky mají různé velikosti a tvary dle odlišných použití. Tato metoda je nástupcem cold knife konizace, u které je použit místo smyčky skalpel. Oproti skalpelu nedochází u LEEP k takovému krvácení a je menší pravděpodobnost předčasného porodu při následném těhotenství. Laserová konizace vyžaduje drahé vybavení a je časově náročná. [16, 17, 18]

Jak již bylo zmíněno, mezi hlavní výhodu excize patří možnost vyšetření odebrané tkáně a určení, zda byl odebrán dostatečný objem. Za přesné měření se považuje ponoření odebrané tkáně do odměrného válce s tekutinou a dle Archimédova zákona se sleduje zvýšení hladiny kapaliny. Měření je prováděno na desetiny nebo až setiny milimetru. Avšak i u této metody byla zjištěna nedokonalost. Při měření objemu v odměrném válci může dojít k uvolnění hlenu z tkáně a jeho rozpuštění ve fyziologickém roztoku. Dojde tak ke zkreslení výsledků. Dále je měření zatíženo chybou jako ostatní metody vyžívající odměrný válec, která je způsobena dělením stupnice. Chyba odměrného válce je typicky polovina nejmenšího dílku na daném válci. Experimentem bylo dokázáno, že měření objemu pomocí CT snímků by byla mnohem přesnější metoda. Bohužel ještě nedošlo k aplikaci v praxi. [19, 20]

Od další metody se již spíše upouští, protože bylo dokázáno, že je nepřesná. Její podstatou je změření rozměrů konizátu, jenž slouží k výpočtu objemu dle vzorce. Vzorec je volen podle geometrického tělesa, kterému se konizát podobá. Jelikož do výpočtu vstupují nepřesné rozměry, je výsledek zatížen velkou chybou.[19, 20]

3 Cíle práce

Cílem této práce je sestavit a realizovat pilotní experimenty s 3D skenery využívající senzory ToF a Lidar, které by měly sloužit při operacích děložního hrdla jako alternativa pro nyní používané metody např. MRI a CT. Primární záměr je určit, zda metody skenování na základě principu odrazu světla jsou vhodné pro provádění snímání před a případně po operaci děložního hrdla. Ze snímaných obrazů by mohlo být určeno množství odebrané tkáně při konizaci. Zjišťování rozlišovací schopnosti a zpracování signálu s cílem dosáhnout co možná nejmenší snímací vzdálenost bude prováděno s využitím modelů z různých materiálů včetně fantomu z masa. Pro zpracování signálu ze sensorů bude využit minipočítač Raspberry Pi.

4 Metody

Tato kapitola obsahuje podrobný popis metodologie použité v rámci této bakalářské práce.

4.1 Skenování pomocí senzorů ToF a Lidar

Senzory ToF a Lidar využívají principu odrazu světla a v našem případě jsou používány pro statické měření vzdálenosti. Jednotlivé senzory jsou popsány v kapitolách 4.1.1 a 4.1.2. Pro získávání dat ze senzorů byly využity kódy sepsané v programovacím jazyce Python a výsledky následně upravovány v programovacím prostředí Matlab 2019a.

4.1.1 Senzor ToF

Jedná se o aktivní senzor, který využívá principu měření doby letu světla, což je ukryto i v jeho názvu Time-of-flight. Zdroj světla, kterým je většinou laser nebo dioda vysílající v IR spektru, vyšle pulz. Tento pulz se odrazí od předmětu a vrátí se do senzoru. Z rozdílu času lze následně vypočítat vzdálenost bodu od senzoru pomocí vztahu (1), kde d je vzdálenost, c rychlost světla a t čas.

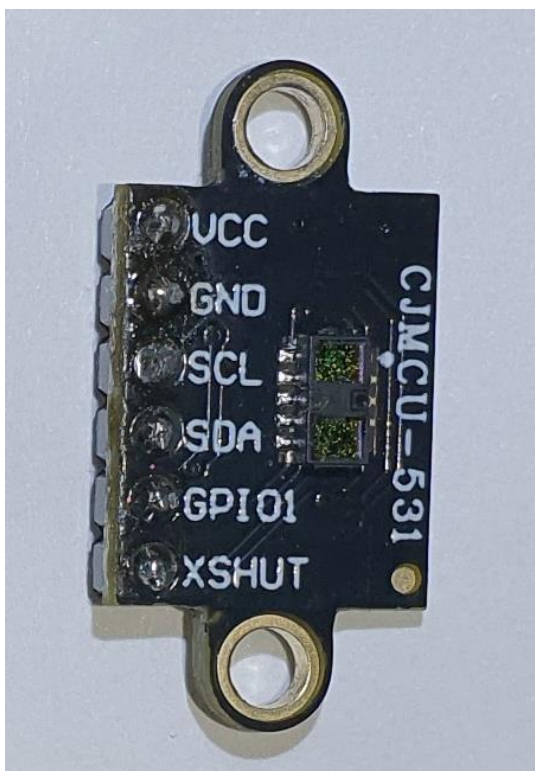
$$d = \frac{c \cdot t}{2} \quad (1)$$

Probléme u tohoto měření nastává u velmi krátkých vzdáleností, kdy časový rozdíl je v řádech pikosekund. [21, 22, 23, 24]

V práci je využíván senzor VL53L1X, který využívá jako zdroj laser o vlnové délce 940 nm. Jeho technické parametry jsou uvedeny v tabulce 4.1 a samotný senzor je vidět na obrázku 4.1. Pro připojení k počítači je využíváno rozhraní I2C. [25]

Tabulka 4.1: Parametry senzoru ToF VL53L1X [25]

Vlnová délka	940 nm
Pracovní napětí	2,8-5 V
Spotřeba při měření	20 mW
Rozsah měření	0 - 4 m
Rozlišení	1 mm
Čas měření	< 33 ms
Rozměry	15,80 mm x 12,60 mm



Obrázek 4.1: Senzor VL53L1X

4.1.2 Senzor Lidar

Lidar je aktivním senzorem, který využívá laser nebo LED diodu v IR spektru. Je založen na podobném principu jako senzor ToF. Může však měřit nejen čas letu, ale i fázový posun mezi vyslaným a přijatým signálem. Z fázového posunu lze následně vypočítat vzdálenost pomocí vztahu (2). [21, 22, 23, 25, 26]

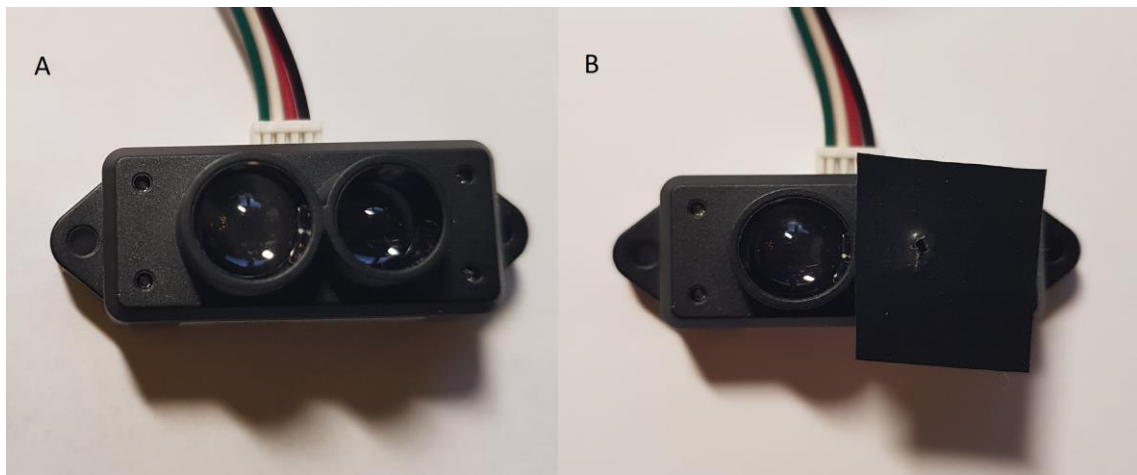
$$d = \frac{c}{2f} \cdot \frac{\varphi}{2\pi} \quad (2)$$

Kde φ je fázový posun akumulovaného náboje a f frekvence signálu. Sensory Lidar se běžně používají ke skenování zemského povrchu nebo v detekčních systémech u automobilů.

V práci je využíván senzor TFMMini-S. Jeho zdrojem je laser o vlnové délce 850 nm. Na rozdíl od senzoru ToF je zde využito rozhraní UART. Kompletní technické údaje jsou vypsány v tabulce 4.2 a samotný senzor je zobrazen na obrázku 4.2A. V technických parametrech je uvedeno, že vysílaný paprsek svírá úhel přibližně 2° , proto bylo provedeno zúžení vysílaného paprsku (v našem měření pomocí lepicí pásky s dírkou-obrázek 4.2B), aby došlo k zpřesnění paprsku.

Tabulka 4.2: Parametry senzoru Lidar TFMini-S [27]

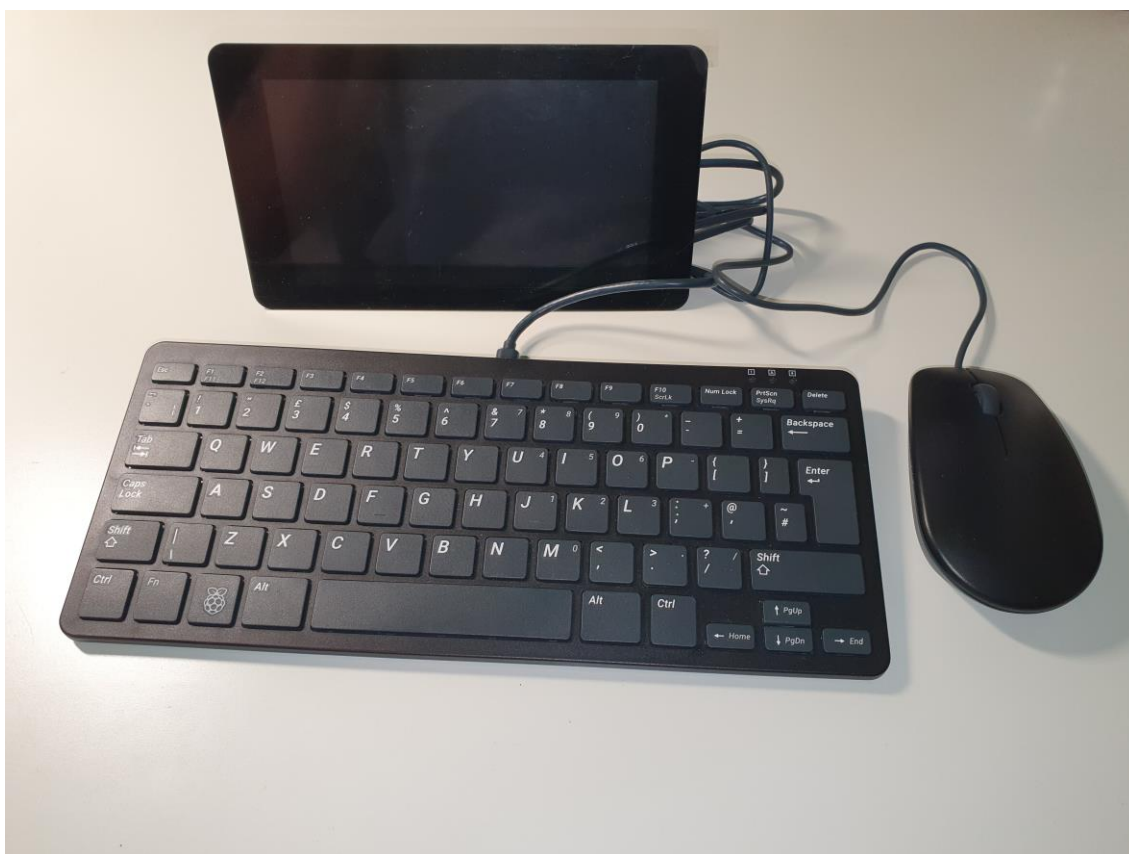
Vlnová délka	850 nm
Pracovní napětí	4,5 - 6 V
Spotřeba při měření	0,6 W
Rozsah měření	0,3 - 12 m
Rozlišení	1 cm
Čas měření	10 ms
Rozměry	42 mm x 15 mm x 16 mm



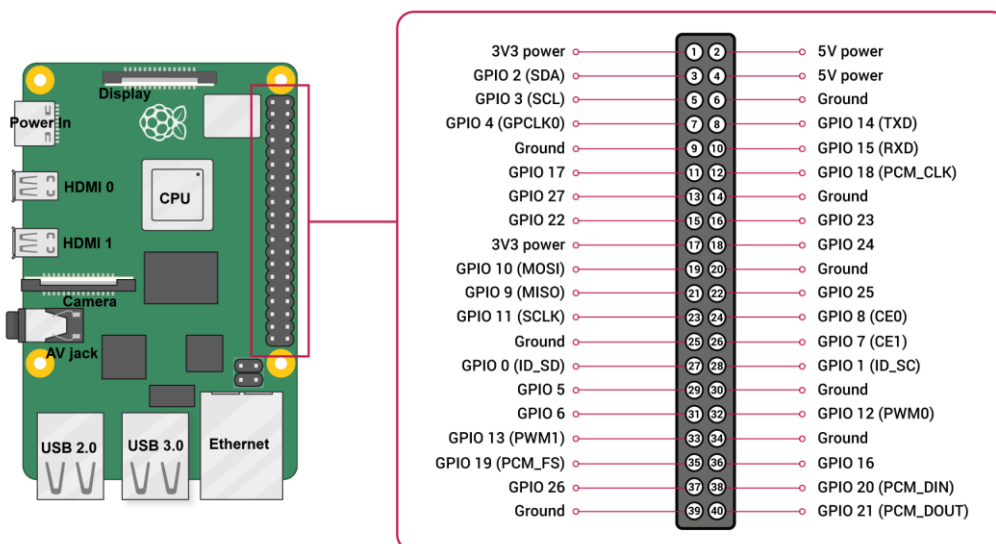
Obrázek 4.2: A) Senzor TFMini-S B) Senzor TFMini-S se clonkou pro zúžení vysílaného paprsku

4.1.3 Raspberry Pi

K ovládání komponent celého systému jednotlivých senzorů a sběru dat je používán minipočítač Raspberry Pi 4 Model B. Jedná se o jednodeskový počítač o velikosti kreditní karty, který je schopný svým výkonem konkurovat slabším stolním PC. Je vybaven 4 - 8 GB RAM a 1,5GHz procesorem Broadcom BCM2711. Kromě možnosti připojit klasické periferie jako klávesnici, myš či displej je Raspberry Pi vybaven vstupními piny, kterými lze k počítači připojit přídatné moduly. V našem případě připojujeme k pinům senzory. Senzor ToF je propojen pomocí rozhraní I2C, na Raspberry Pi piny SDA, SCL, zemi a napájením 3,3 V. Senzor Lidar je připojen skrz rozhraní UART k pinům TXD, RXD, zemi a napájení 5 V. Jako operační systém je používán Raspbian. Kompletní počítač i s periferiemi je zobrazen na obrázku 4.3. Na obrázku 4.4 je popsán samotný minipočítač Raspberry Pi 4 Model B. [28]



Obrázek 4.3: Raspberry Pi 4 B s periferiemi (klávesnice, obrazovka a myš)



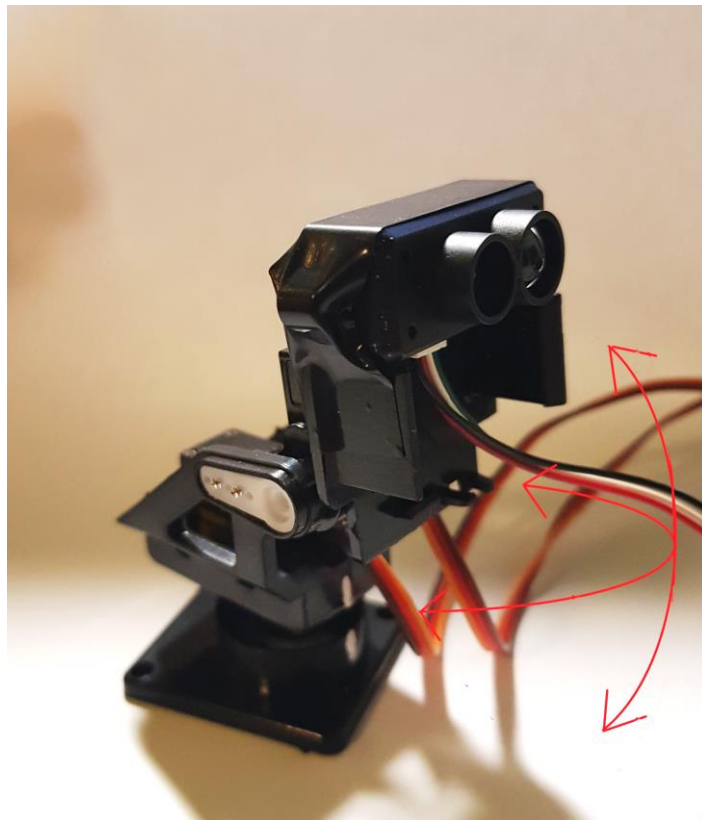
Obrázek 4.4: Popis Raspberry Pi 4 B [29]

4.1.4 Pohyb senzorů

Senzory tvoří výsledný obraz na základě získávání určených bodů, které jsou poté zachytávány do „mračna bodů“. Pro tvorbu „mračna“ bodů skenovaného objektu je potřeba, aby se se senzorem hýbalo v pevně daných souřadnicích tak, že je pokryta celá skenovaná oblast. U některých typů Lidaru je použit pro 2D snímání motor, který otáčí senzorem a je schopen pokrýt 360°. U 3D Lidaru může být použit například hranol, který vychyluje paprsek světla. Pro pohyb v našem případě byly využity 2 servo motory SG90. Jejich technické parametry jsou uvedeny v tabulce 4.3. Motory jsou umístěny v plastovém otočném držáku. Jeden motor hýbe se senzorem v ose x o 10° v obou směrech s krokem jednoho stupně a druhý v ose y se stejným rozsahem a krokem. Motory jsou taktéž připojeny k Raspberry Pi k pinům PWM0 (PWM1), zemi a napájení 5 V. Na obrázku 4.5 můžeme vidět celou sestavu se senzorem (TFMini-S), servo motory, plastovým držákem a naznačeným směrem pohybu. [29]

Tabulka 4.3: Technické parametry servo motorů SG90

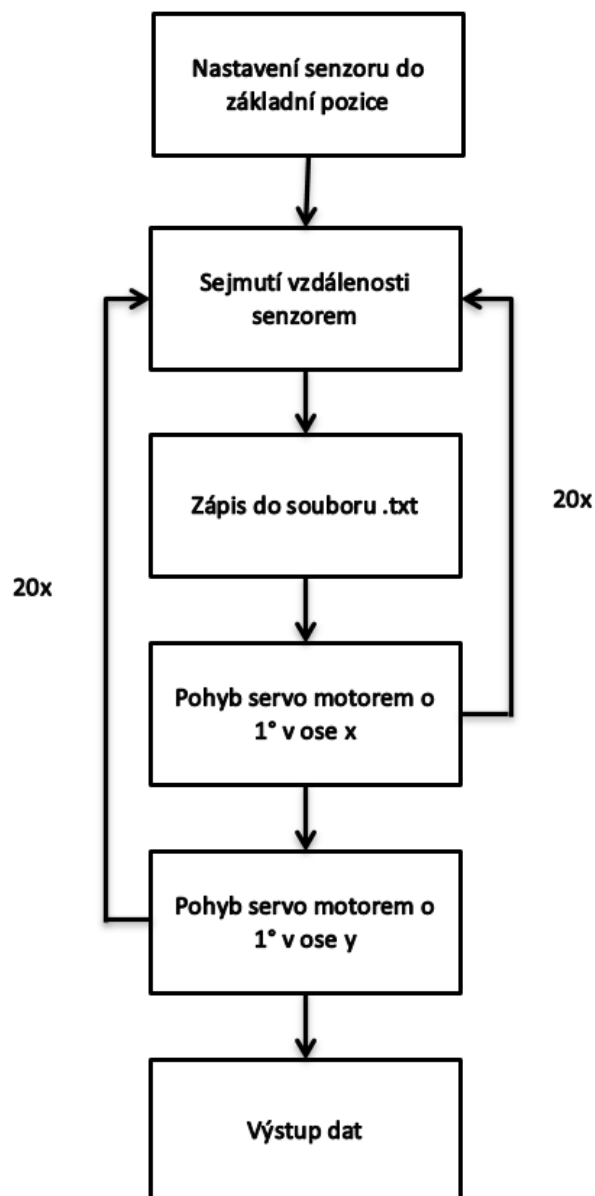
Provozní napětí	3 - 7 V
Rychlost otáčení	60°/0,12 s
Točivý moment	1,2 kg / 42.3 oz
Rozměry	22 mm x 11,5 mm x 27 mm



Obrázek 4.5: Sestava senzoru TFMini-S, servo motorů a jejich držáku

4.1.5 Princip snímání a zpracování dat

Výstupem samotného snímání je matice o rozměrech 21x21, což představuje jednotlivé vzdálenosti senzoru od povrchu objektu v různých souřadnicích. Pomocí prvního servo motoru, pohybujícím se v ose x, se nejdříve změří hodnoty od -10° do $+10^\circ$. Poté se druhým servo motorem pohne senzor o stupeň v ose y. Takto se cyklus opakuje, dokud není vyplněna celá matice. Matice je ukládána do samostatného textového souboru, aby byla snadno přenositelná a kompatibilní. Blokové schéma kódu můžeme vidět na obrázku 4.6 a samotný kód v příloze A a B.

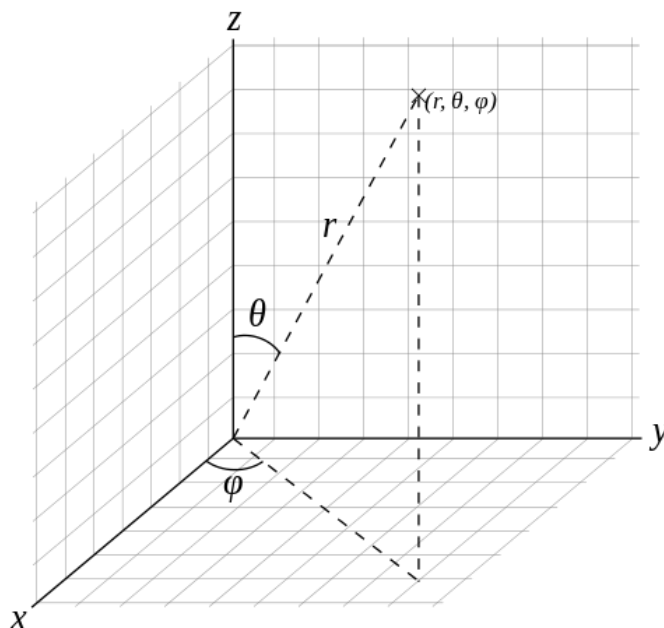


Obrázek 4.6: Blokové schéma kódu pro snímání senzorem

Po nasnímání je matice přenesena do programového prostředí Matlab. V Matlabu je nejdříve zkalibrována vzdálenost pro různé materiály (platí pro senzor Lidar) a následně je převedena ze sférických do kartézských souřadnic (schématický náčrt můžeme vidět na obrázku 4.8 a použité vztahy jsou uvedeny v rovnicích (3) až (5) [33]). Následně proběhne odstranění příliš vzdálených bodů a interpolace, která nám zlepší finální zobrazení. Pro samotné zpracování „mračna bodů“ existuje v prostředí Matlab samostatný Toolbox, který je však zaměřený spíše na praktická využití v dopravě nebo další kalibrace pomocí kamery. Blokové schéma kódu můžeme vidět na obrázku 4.7 a samotný kód v příloze B.



Obrázek 4.7: Blokové schéma úpravy dat v programovém prostředí Matlab



Obrázek 4.8: Sférické souřadnice [31]

$$x = r \cdot \sin\theta \cdot \cos\varphi \quad (3)$$

$$y = r \cdot \sin\theta \cdot \sin\varphi \quad (4)$$

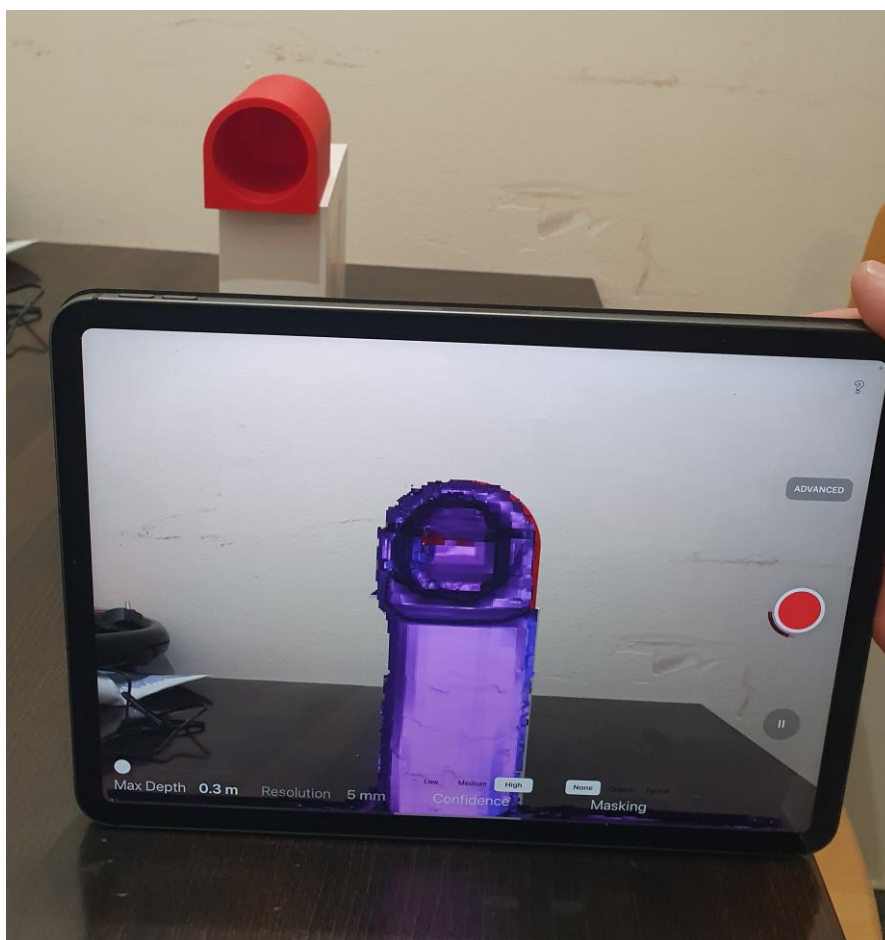
$$z = r \cdot \cos\theta \quad (5)$$

4.2 Lidar obsažen v zařízeních Apple

Pro porovnání s navrženými typy skenerů byl použit na trhu volně dostupný senzor Lidar, který je obsažen ve vyšší řadě novějších přístrojů od firmy Apple (přesněji se jedná o zařízení iPhone 12 Pro/Pro Max, iPhone 13 Pro/Pro Max a iPad Pro 2020). Senzor je umístěn vedle fotoaparátu viz obrázek 4.9 a primárně by měl pomáhat při fotografování pro přesnější zaostření nebo zrychlit ostření v horších podmínkách. Existuje však mnoho dalších rozšiřujících aplikací, které umožňují využít zařízení jako měřič vzdálenosti nebo využívající rozšířenou realitu. Právě jedno z využití senzoru pomocí aplikace slouží také ke 3D skenování. V rámci bakalářské práce byla využita aplikace 3D Scanner app, která nabízí nastavení různého druhu zobrazování a možnost nastavení rozlišení. Samotný výrobce neudává žádné upřesňující informace o senzoru kromě maximální vzdálenosti, která je 5 metrů. V samotné aplikaci lze nastavit rozlišení od 5 do 20 mm. [32]



Obrázek 4.9: Senzor Lidar na přístrojích firmy Apple [35]



Obrázek 4.10: Snímání modelu pomocí iPadu Pro v aplikaci 3D Scanner app

Zařízení od firmy Apple se v praxi již hojně využívají např. v protetice, kde dojde k nasnímání těla pomocí senzoru Occipital Structure 3D Sensor, což je optický senzor. [34]

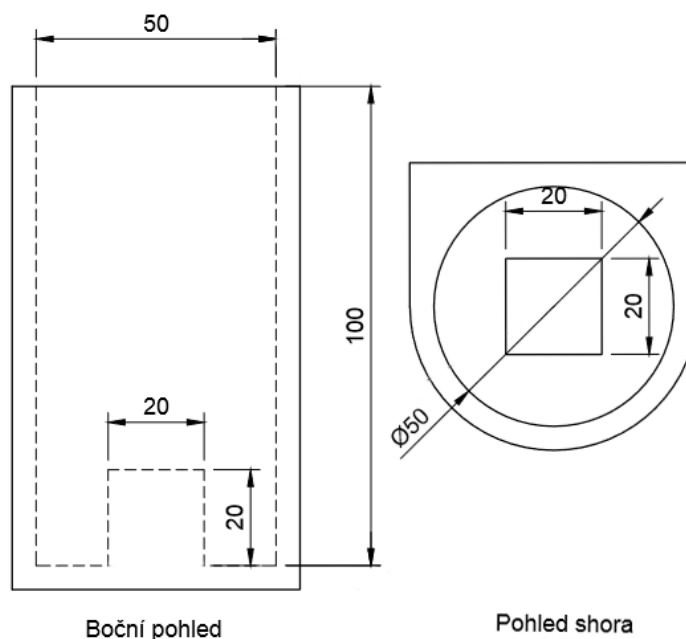
4.3 Fantomy a samotné měření

Při konstrukci 3D skenerů byly použity jednoduché modely z polystyrenu, na kterých byla zkoušena prvotní funkčnost. Ty měly různé jednoduché tvary, aby bylo provedeno prvotní hrubé měření a získána přibližná přesnost senzorů. Ukázka modelů je na obrázku 4.11 A-C.

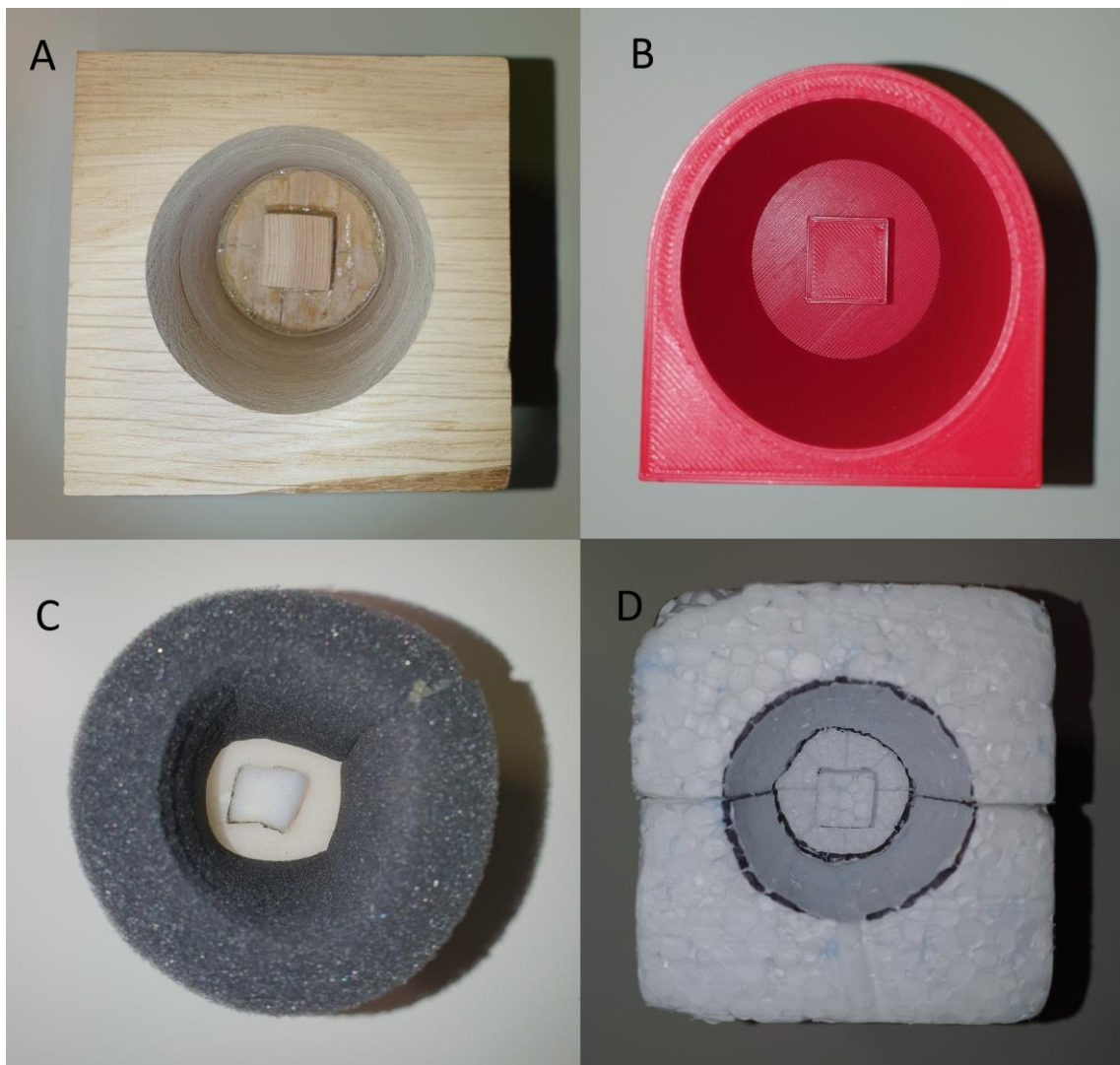


Obrázek 4.11 A,B,C: Různé typy polystyrenu použité při zkoušce skenování

Samotné kalibrování přístrojů probíhalo nejdříve při jednoduchém měření vzdáleností od překážky. Takto se provedla prvotní kalibrace senzoru a byla vytvořena kalibrační křivka. Kalibrace následně musela být upravena dle různých materiálů a snímaného prostředí, protože senzor měřil různé vzdálenosti při měření v otevřeném a uzavřeném prostředí (kalibrační křivka je uvedena na grafu 5.1). Tento problém byl následně kalibrován a zkoušen na modelech z různého materiálu (dřevo, polystyren, plast z 3D tiskárny, molitan), které již svým tvarem a rozměry odpovídaly zjednodušenému tvaru děložního čípku. Jedná se o válec o délce 10 cm, na jehož dně je uprostřed umístěna krychle o délce hrany 2 cm. Schématický náčrt je vidět na obrázku 4.12 a skutečné modely pak na obrázku 4.13 A,B,C,D.



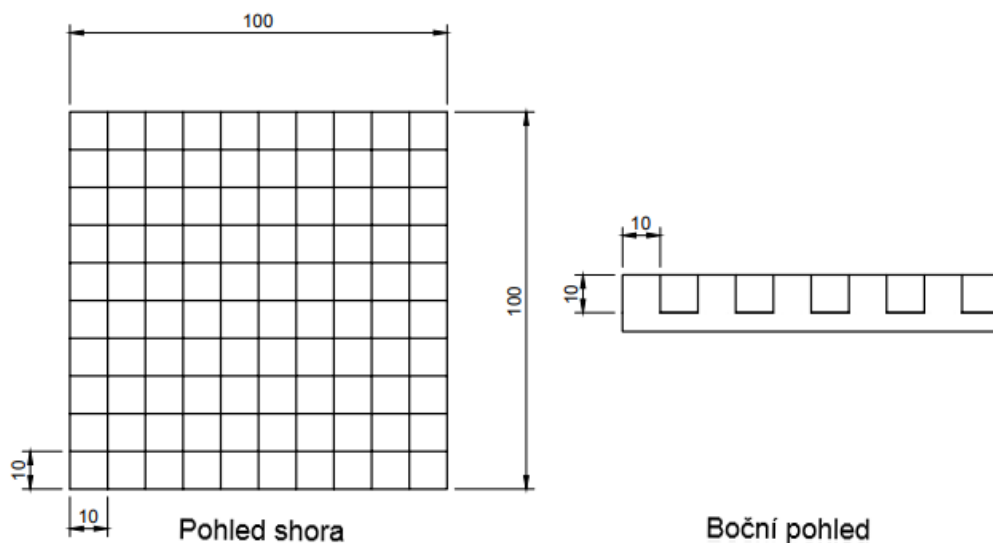
Obrázek 4.12: Schématický náčrt pro modely z různého materiálu (náčrt je uveden v mm)



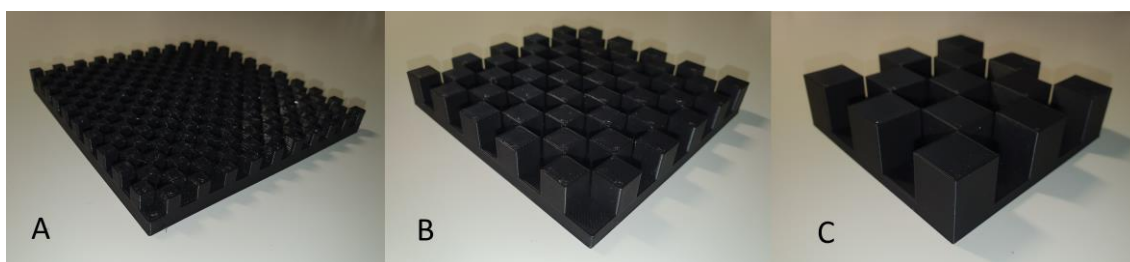
Obrázek 4.13: A) dřevěný model B) plastový model C) molitanový model D) polystyrenový model

Měření vždy probíhalo při stejné vzdálenosti od senzoru, tj. 10 cm, tak aby byl model v měřitelném rozsahu senzoru Lidar. Model byl vždy umístěn do středu zorného pole senzoru tak, aby senzor pokryl celou námi skenovanou oblast. Snímání bylo několikrát opakováno s mírně pozměněným natočením modelu.

Poslední otestování přesnosti a rozlišení bylo provedeno na třech fantomech vyrobených z plastu na 3D tiskárně Průša MK3S z materiálu PLA. Tyto fantomy jsou vytvořeny z kostek, které jsou střídavě uspořádány na destičce o rozměrech 10x10 cm a tvoří tak „šachovnice“. Každý ze tří modelů je tvořen jinak velikými krychlemi. Nejmenší „šachovnice“ je tvořena kostkami o hraně 0,5 cm, střední o hraně kostek 1 cm a největší o délce hran 2 cm. Tyto modely měly odhalit jak prostorové rozlišení, tak minimální měřitelné rozdíly. Náčrt fantomu pro 1 cm je zobrazen na obrázku 4.14 a všechny tři fantomy jsou ukázány na obrázku 4.15 A, B, C. V příloze D jsou přiloženy detailní náčrty všech tří modelů. Modelování probíhalo v programu Fusion 360.



Obrázek 4.14: Schématický nákres pro „šachovnici“ o délce hrany 1 cm (nákres je uveden v mm)

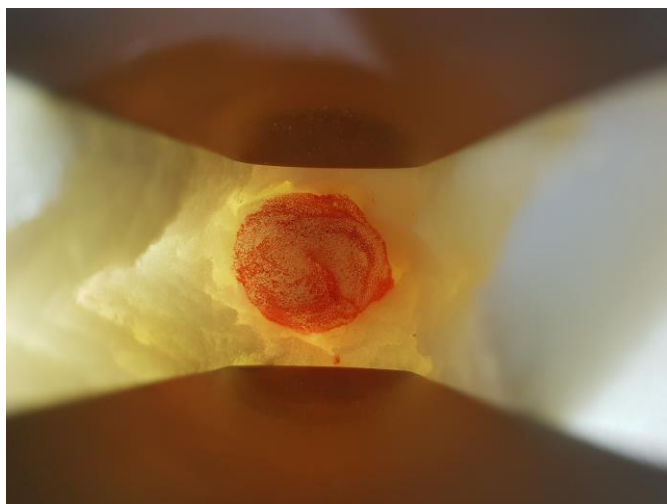


Obrázek 4.15: Plastové fantomy „šachovnice“ o délkách hran krychlý A) 0,5 cm B) 1 cm C) 2 cm

Samotné skenování na fantomech děložního čípku probíhalo za pomoci gynekologického zrcadla (obrázek 4.16), které se umístilo do fantomu (obrázek 4.17). První model děložního čípku je vyroben z molitanu, který představuje tkáň. Hloubka fantomu je přibližně 9 cm a na dně je umístěn přibližně 1,5 cm vysoký kulovitý výstupek simulující děložní čípek.

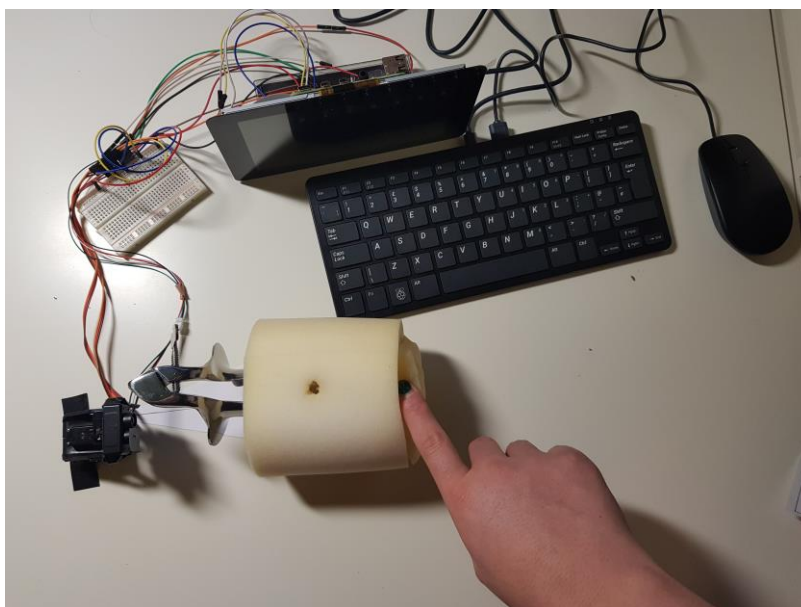


Obrázek 4.16: Gynekologická zrcadla



Obrázek 4.17: Molitanový fantom s gynekologickým zrcadlem

Na obrázku 4.18 můžeme vidět celou měřicí soustavu obsahující stojan se servo motory a senzorem Lidar, Raspberry Pi skenující molitanový fantom s gynekologickým zrcadlem.

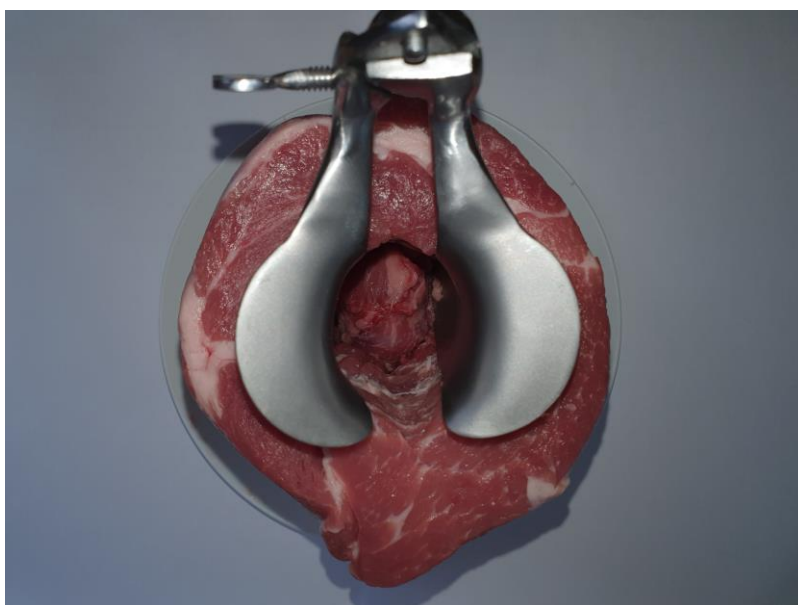


Obrázek 4.18: Celá měřicí soustava s molitanovým fantomem

Poslední měření bylo provedeno na fantomu vyrobeném z masa, který již plně simuloval skutečnou pochvu i s děložním hrdlem jak rozměry, tak materiálem. K výrobě modelu bylo použito maso z vepřové pleci bez kosti a jednotlivé části k sobě byly přišity nití. Hloubka fantomu je 10 cm a na dně je opět připevněn přibližně dvoucentimetrový výstupek. Na obrázku 4.19 můžeme vidět výstupek z profilu, který je jinak zašit v pochvě, takže jej nelze pořádně změřit. Na obrázku 4.20 je vyobrazen pohled do fantomu pomocí gynekologického zrcadla a na obrázku 4.21 je snímání pomocí senzoru ToF.



Obrázek 4.19: Simulovaný děložní čípek z profilu



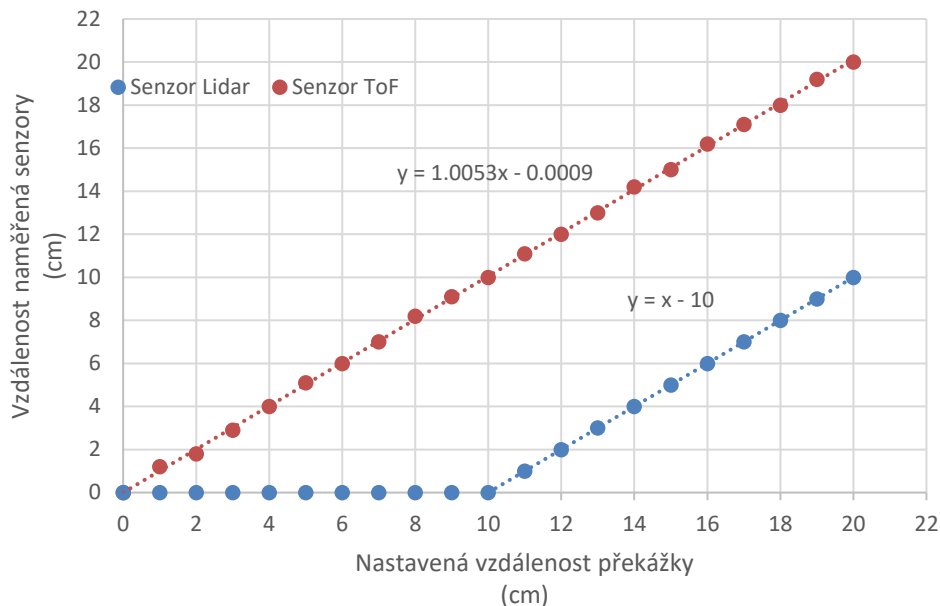
Obrázek 4.20: Masový fantom s gynekologickým zrcadlem



Obrázek 4.21: Skenování masového fantomu senzorem ToF

5 Výsledky

Graf 5.1 ukazuje kalibrační křivku pro senzor ToF a Lidar sestavenou při měření s papírem.



Graf 5.1: Kalibrační křivka pro senzory ToF a Lidar

V tabulce 5.1 a 5.2 jsou uvedeny hodnoty naměřené na zjednodušených modelech děložního čípku z různých materiálů (Obrázek 4.13 A, B, C, D). Hodnoty jsou uvedeny pro délku na dno modelu, k výstupku a největší průměr v celé délce nasnímaného tělesa. Dále je uveden obsah horní rovinné oblasti výstupku simulující děložní čípek.

Tabulka 5.1: Nasnímané hodnoty senzorem ToF

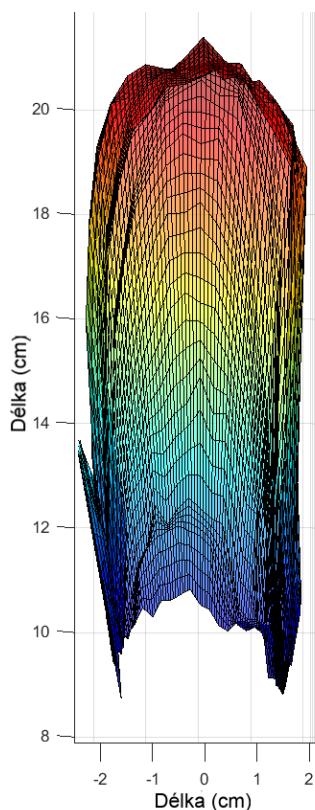
Model	Délka na dno (cm)	Délka k výstupku (cm)	Průměr tělesa (cm)	Obsah výstupku (cm ²)
Teoretické hodnoty	10,0	8,0	5,0	4,00
Dřevěný model	11,2	-	3,6	-
Plastový model	10,8	-	4,0	-
Molitanový model	9,8	-	3,2	-
Polystyrenový model	12,6	-	5,1	-

Na skenech s tímto senzorem nebyl výstupek viditelný, proto nejsou veškerá data dostupná.

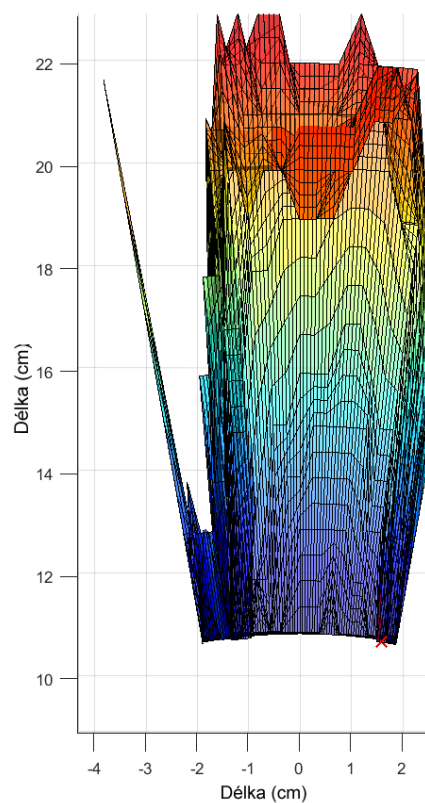
Tabulka 5.2: Naměřené hodnoty senzorem Lidar

Model	Délka na dno (cm)	Délka k výstupku (cm)	Průměr tělesa (cm)	Obsah výstupku (cm ²)
Teoretické hodnoty	10,0	8,0	5,0	4,00
Dřevěný model	9,2	6,7	4,0	0,48
Plastový model	11,3	8,0	4,8	2,80
Molitanový model	12,0	7,0	3,6	0,58
Polystyrenový model	20,1	15,2	7,4	1,77

Na obrázcích 5.1 a 5.2 jsou zobrazeny skeny v řezu z plastového modelu děložního čípku pomocí použitých senzorů. Samotný děložní čípek je pro lepší viditelnost mírně zvýrazněn.

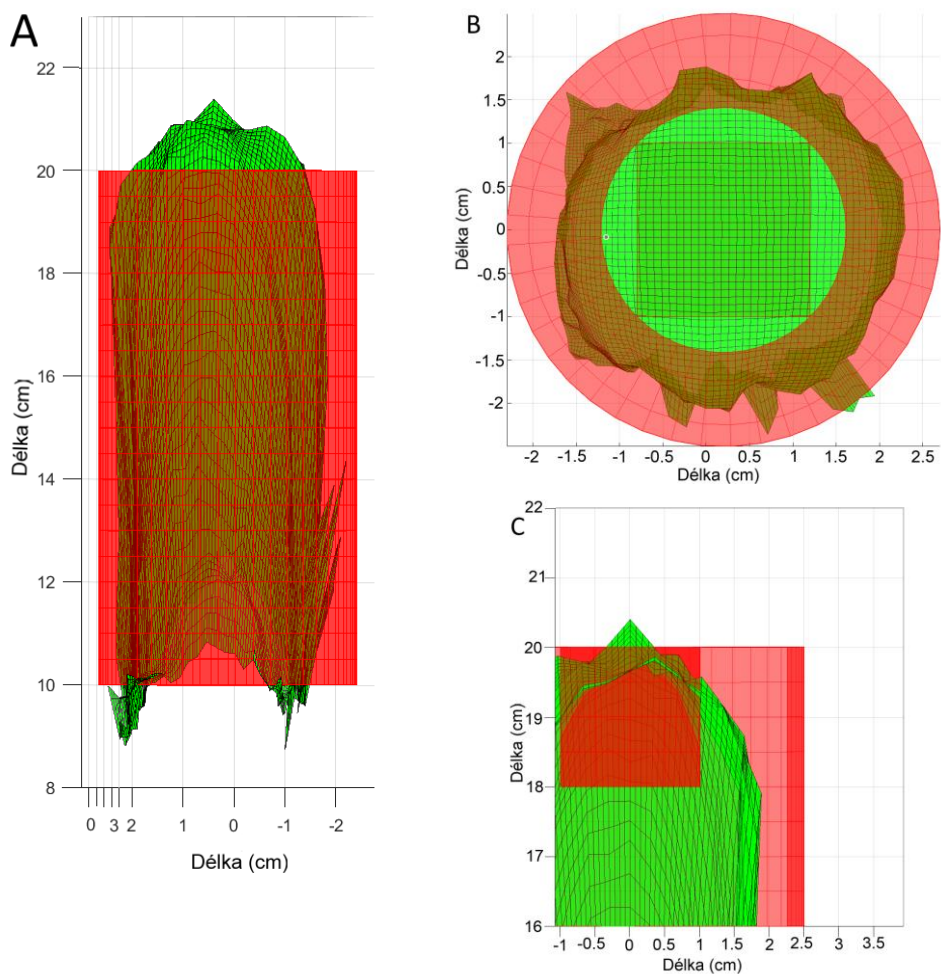


Obrázek 5.1: Sken plastového modelu - senzor ToF (řez)



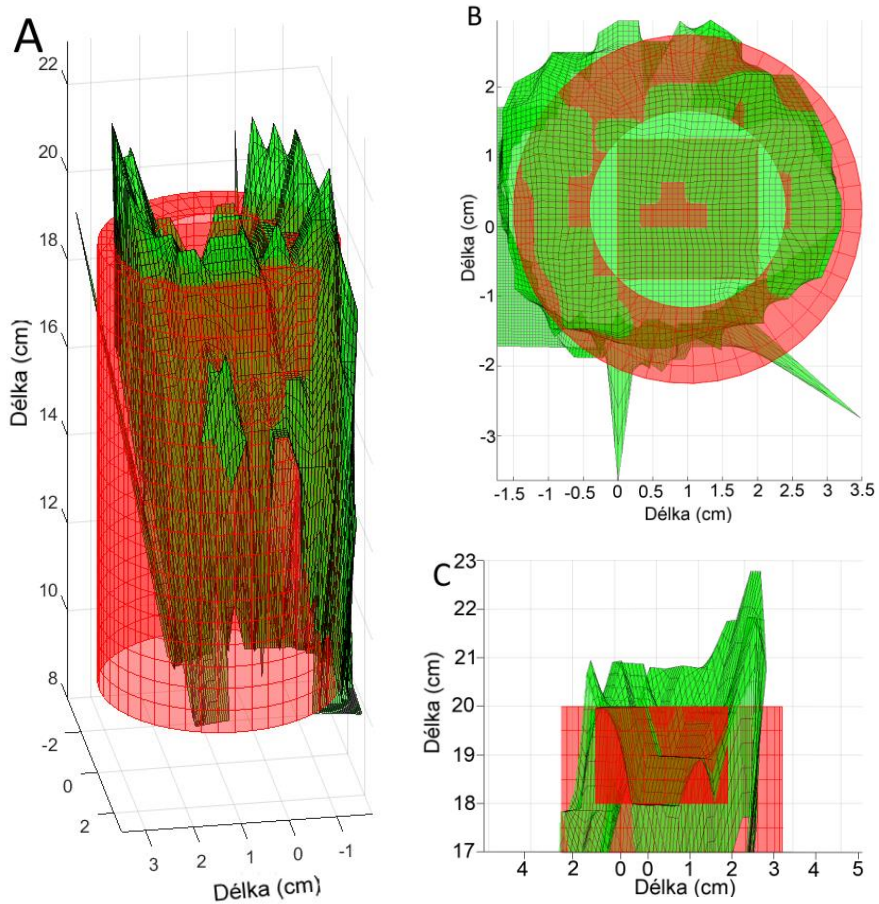
Obrázek 5.2: Sken plastového modelu - senzor Lidar (řez)

Na obrázcích 5.3 A,B,C je uvedeno porovnání senzoru ToF se skenovaným modelem. Protože na skenech ze senzoru ToF nejsou patrné žádné detaily snímaných modelů, bude porovnání uvedeno pouze pro model z plastu jako příklad za všechny modely a porovnání pro ostatní materiály budou zobrazena v příloze E.



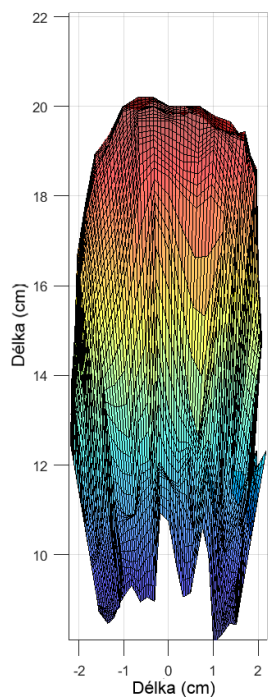
Obrázek 5.3: Porovnání skenu ze senzoru ToF s plastovým modelem A) boční pohled B) horní pohled C) výřez děložního čípku

Na obrázcích 5.4 A,B,C je uvedeno porovnání skenu ze senzoru Lidar se snímaným modelem z plastu.

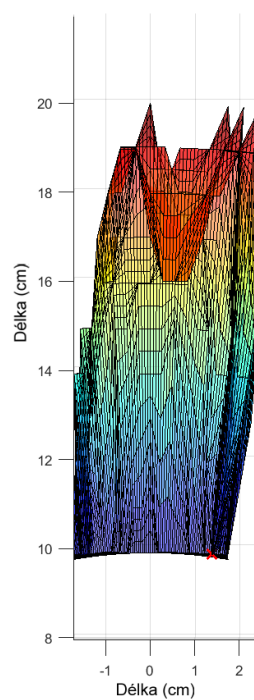


Obrázek 5.4: Porovnání skenu ze senzoru Lidar s plastovým modelem A) boční pohled B) horní pohled C) výřez děložního čípku

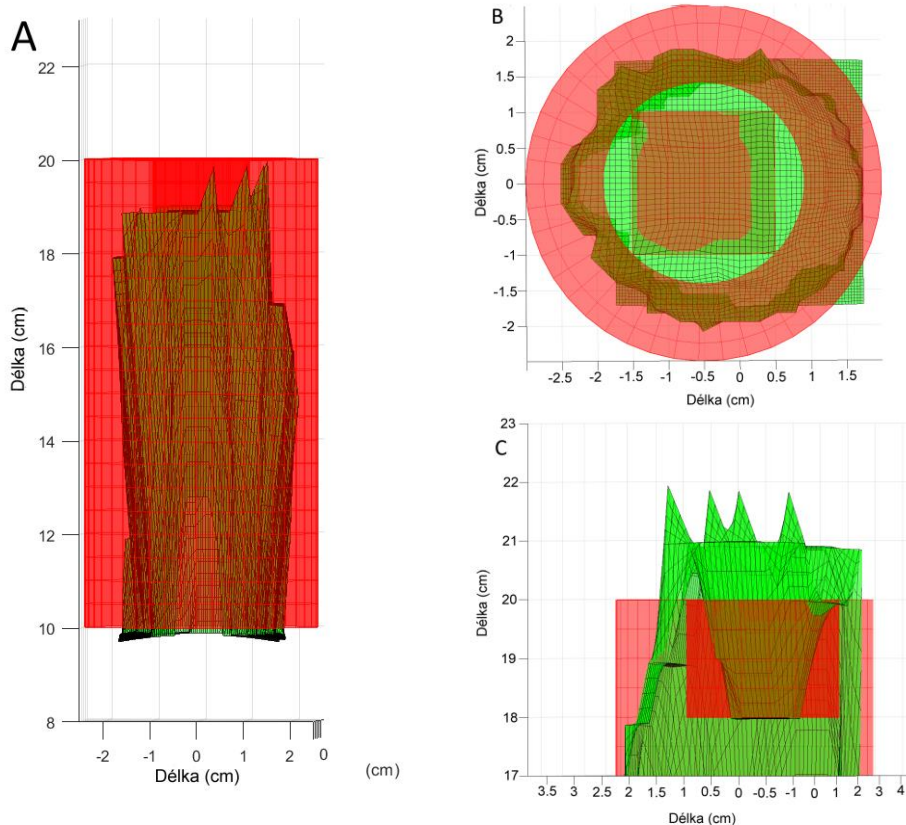
Na obrázcích 5.5 a 5.6 je zobrazen sken dřevěného modelu ze senzorů ToF a Lidar.



Obrázek 5.5: Sken dřevěného modelu - senzor ToF (řez)

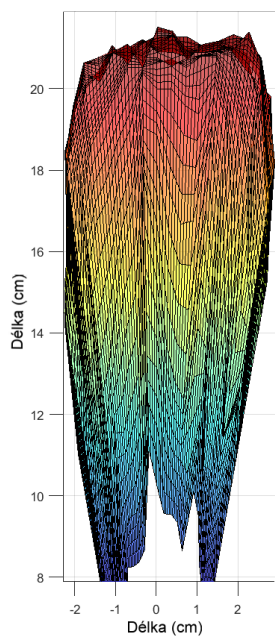


Obrázek 5.6: Sken dřevěného modelu - senzor Lidar (řez)

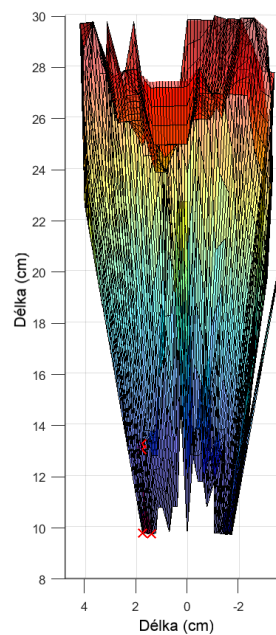


Obrázek 5.7: Porovnání skenu ze senzoru Lidar s dřevěným modelem A) boční pohled B) horní pohled C) výřez děložního čípku

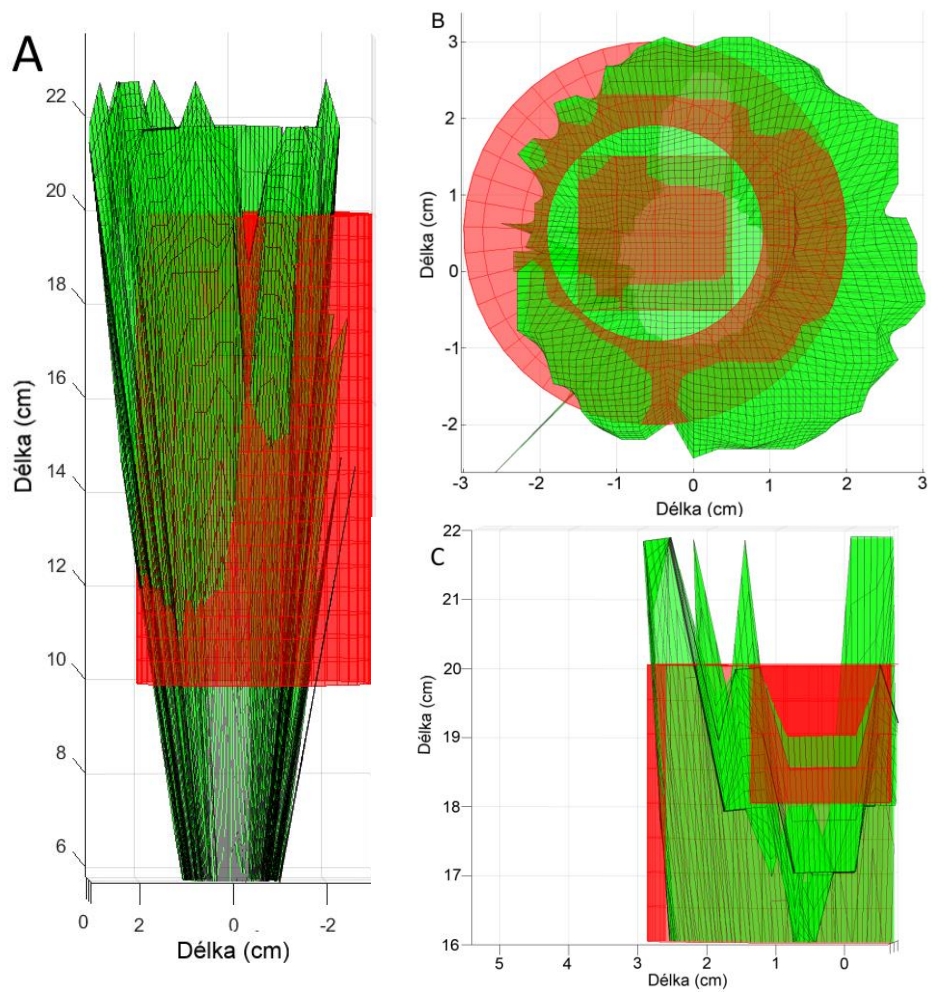
Na obrázcích 5.8 a 5.9 jsou vidět skeny polystyrenového modelu, následně na obrázcích 5.11 a 5.12 jsou vidět skeny z molitanového modelu. Na obrázcích 5.10 A,B,C a 5.13 A,B,C je vidět porovnání skenů Lidar s příslušnými modely.



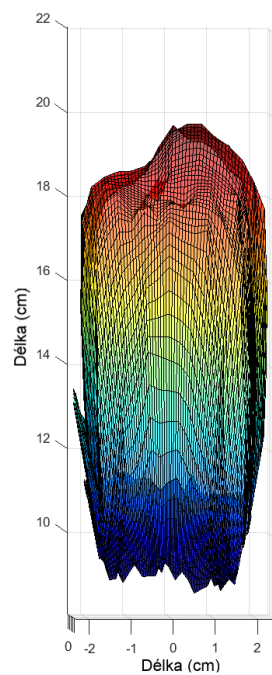
Obrázek 5.8: Sken polystyrenového modelu - senzor ToF (řez)



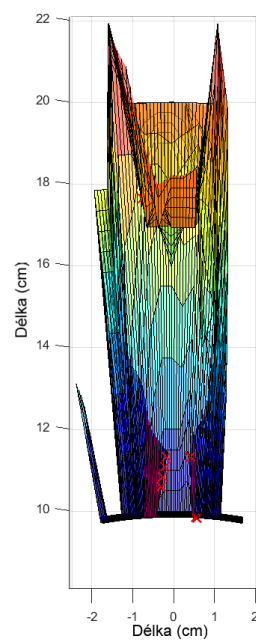
Obrázek 5.9: Sken polystyrenového modelu - senzor ToF (řez)



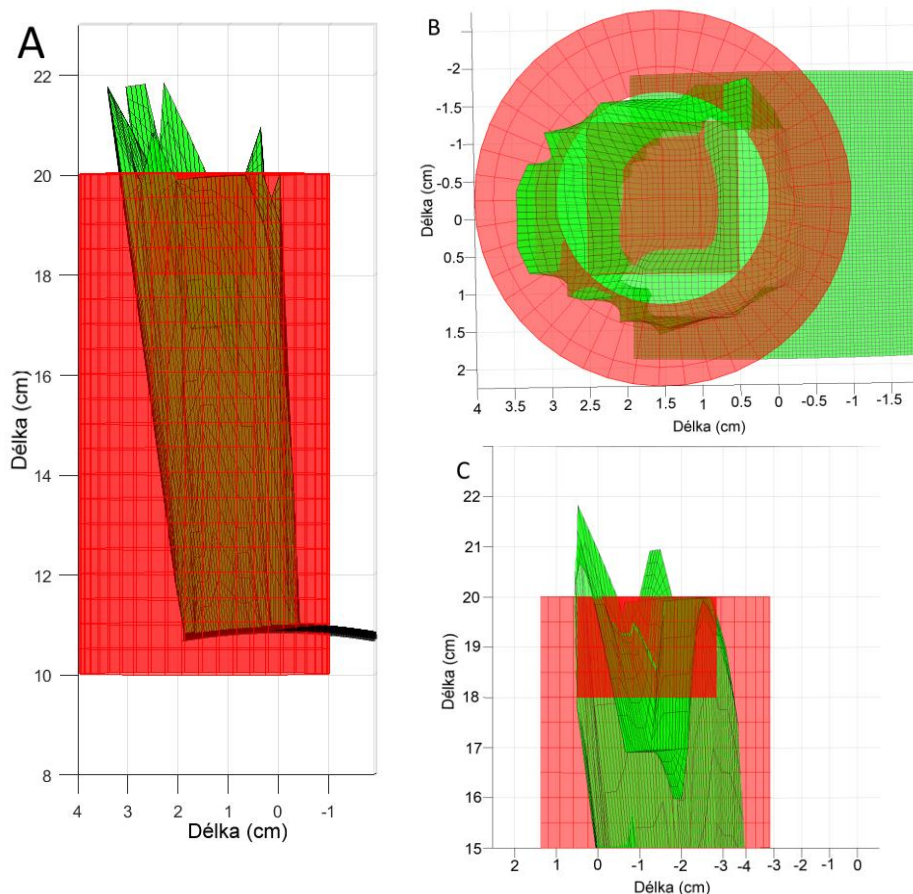
Obrázek 5.10: Porovnání skenu ze senzoru Lidar s polystyrenovým modelem A) boční pohled B) horní pohled C) výřez děložního čípku



Obrázek 5.11: Sken molitanového modelu - senzor ToF (řez)



Obrázek 5.12: Sken molitanového modelu - senzor Lidar (řez)

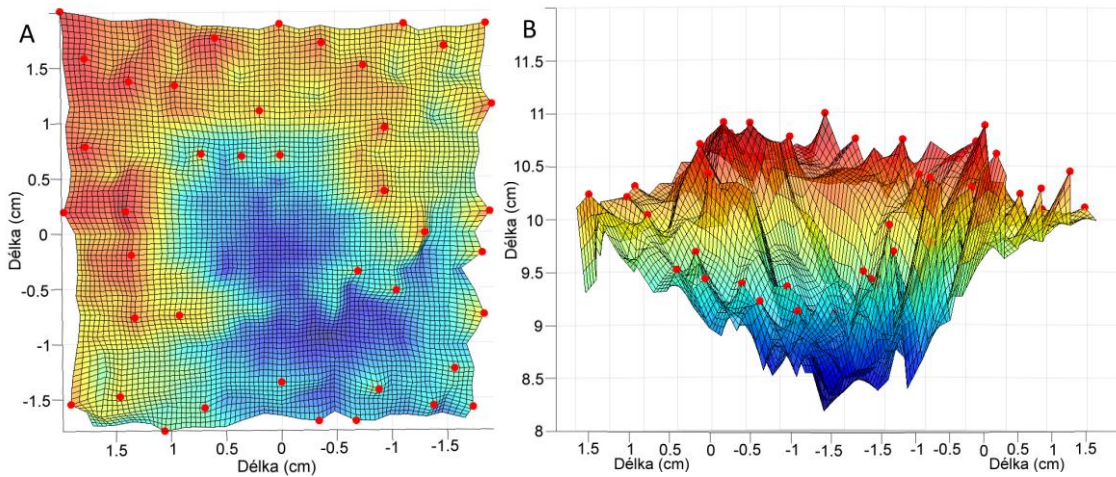


Obrázek 5.13: Porovnání skenu ze senzoru Lidar s molitanovým modelem A) boční pohled B) horní pohled C) výřez děložního čípku

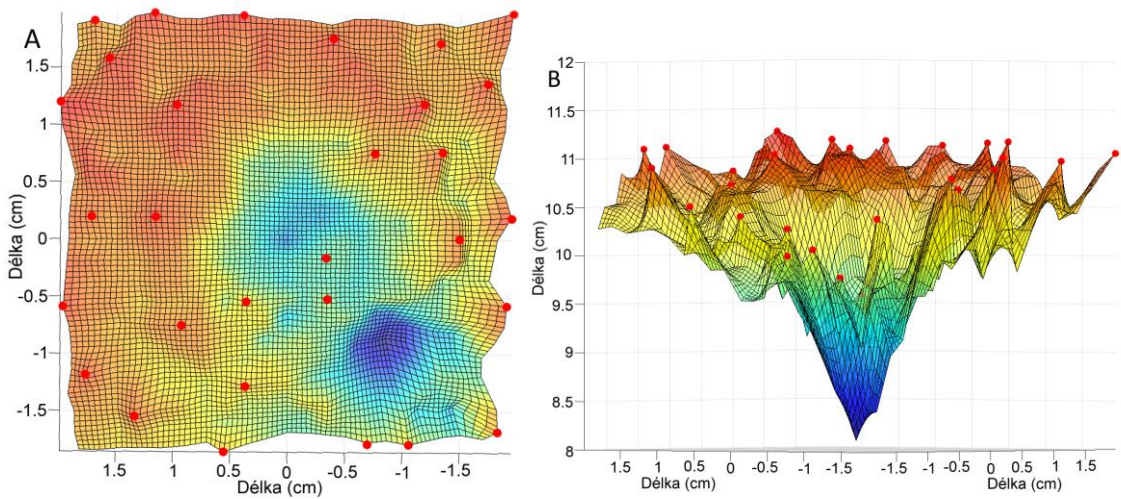
Na obrázcích 5.14 - 5.19 A,B jsou vidět skeny šachovnicových modelů (obrázek 4.14 a 4.15) na ověření přesnosti. Modely jsou ukázány vždy shora a z bočního pohledu. U skenů nebyl zobrazen snímaný model jako u předešlých fantomů, protože nejde na skenech najít bod, podle kterého by se dal snímaný model nastavit. Vrcholy, kde by se měly nacházet jednotlivé výstupky jsou označeny červenou tečkou popřípadě jsou naznačeny čtverce, kde by se měly vyskytovat.

Tam, kde nebylo možné zaznamenat výstupky, byla vyhodnocována vzdálenost od bodu k němu nejbližšímu bodu. Takováto průměrná vzdálenost vyšla u senzoru ToF pro model s délkou hrany 0,5 cm 0,32 cm a průměrná výška bodů je 0,42 cm. Pro model s délkou hrany 1 cm je to 0,35 a průměrná výška je 0,63. Pro šachovnici s délkou hrany 2 cm nebyl zaznamenán žádný bod.

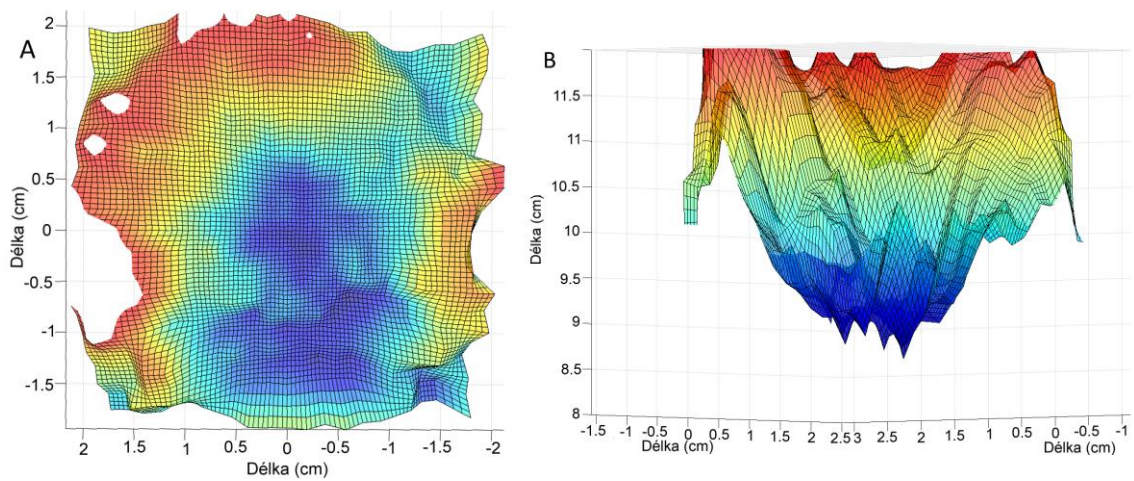
U senzoru Lidar byla průměrná vzdálenost k nejbližšímu bodu 0,7 a výška 1 cm pro model s délkou hrany 0,5 cm. U šachovnice s délkou hrany 1 cm, již je na skenu patrný náznak čtverců. Průměrná hrana výstupku je 0,38 cm a výška výstupku je opět 1 cm. Pro šachovnici s délkou hrany 2 cm pak vyšla průměrná délka hrany výstupku skenu 1 cm a průměrná výška 2,12 cm.



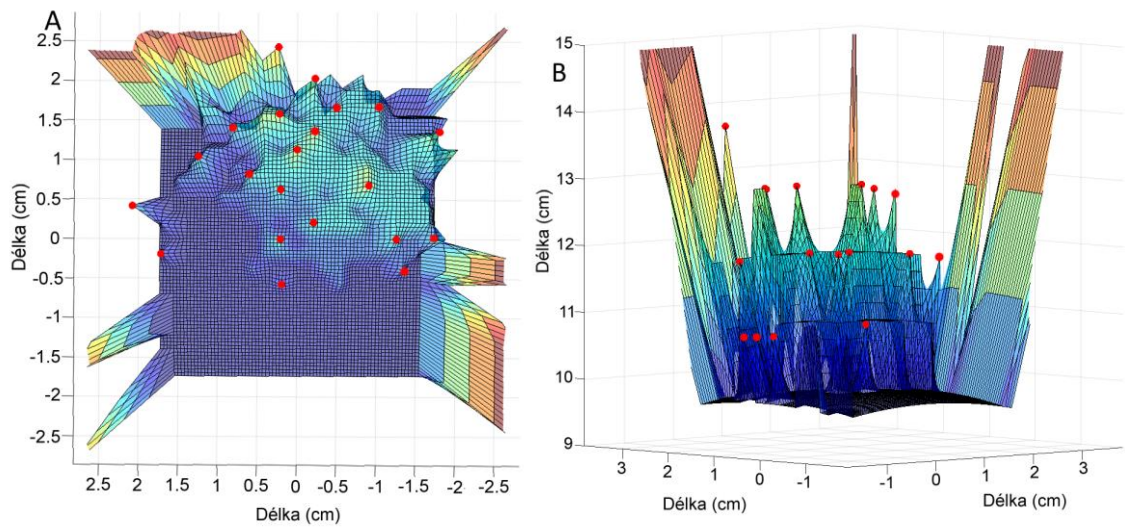
Obrázek 5.14: Sken šachovnicového modelu o délce hrany 0,5 cm senzorem ToF A) shora B) boční pohled



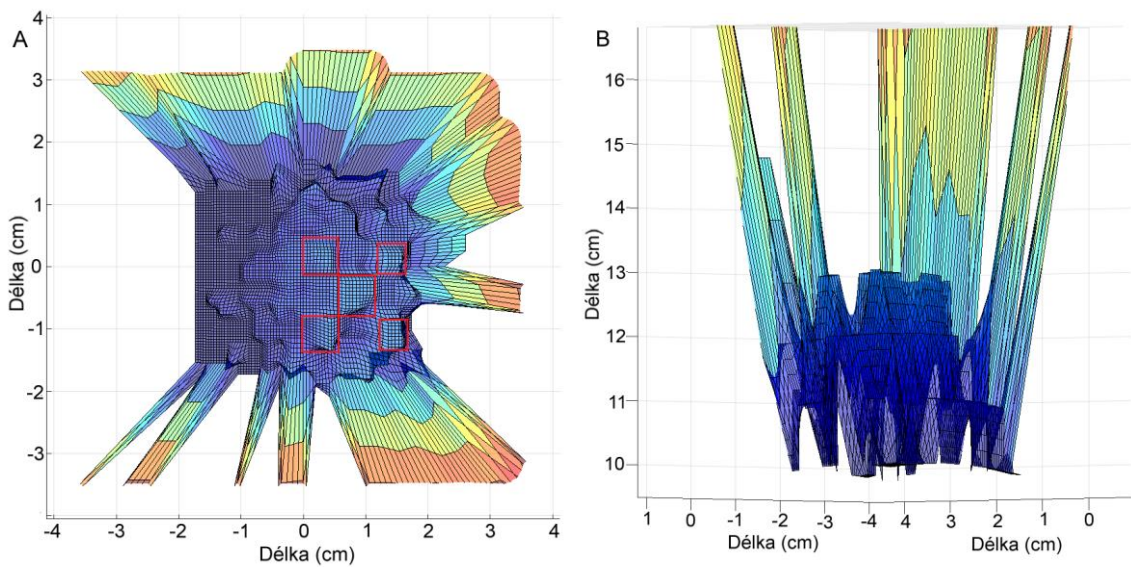
Obrázek 5.15: Sken šachovnicového modelu o délce hrany 1 cm senzorem ToF A) shora B) boční pohled



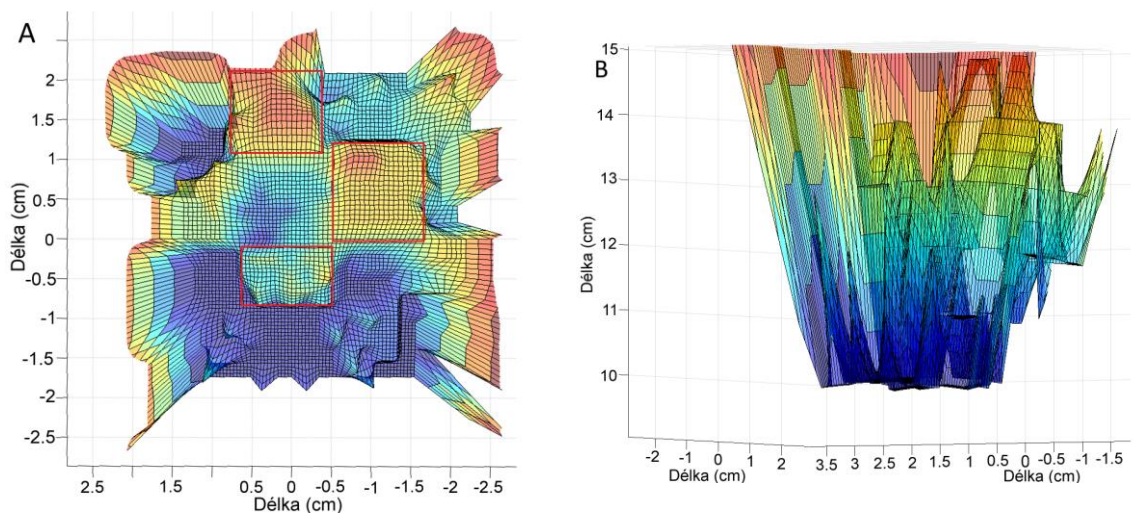
Obrázek 5.16: Sken šachovnicového modelu o délce hrany 2 cm senzorem ToF A) shora B) boční pohled



Obrázek 5.17: Sken šachovnicového modelu o délce hrany 0,5 cm senzorem Lidar A) shora B) boční pohled

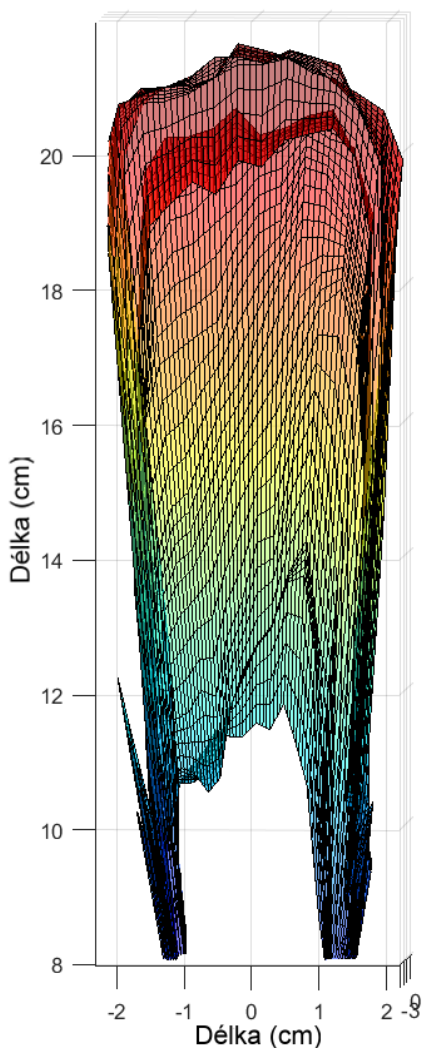


Obrázek 5.18: Sken šachovnicového modelu o délce hrany 1 cm senzorem Lidar A) shora B) boční pohled

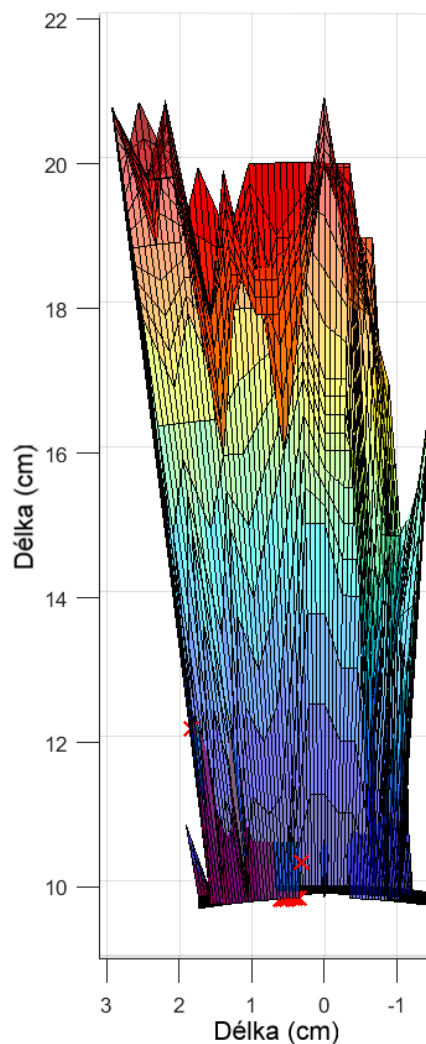


Obrázek 5.19: Sken šachovnicového modelu o délce hrany 1 cm senzorem Lidar A) shora B) boční pohled

Před závěrečným skenováním masového modelu bylo provedeno poslední ověření na molitanovém modelu (obrázek 4.17). Výsledné obrázky 5.20 a 5.21 zobrazují skeny senzory ToF a Lidar v řezu.

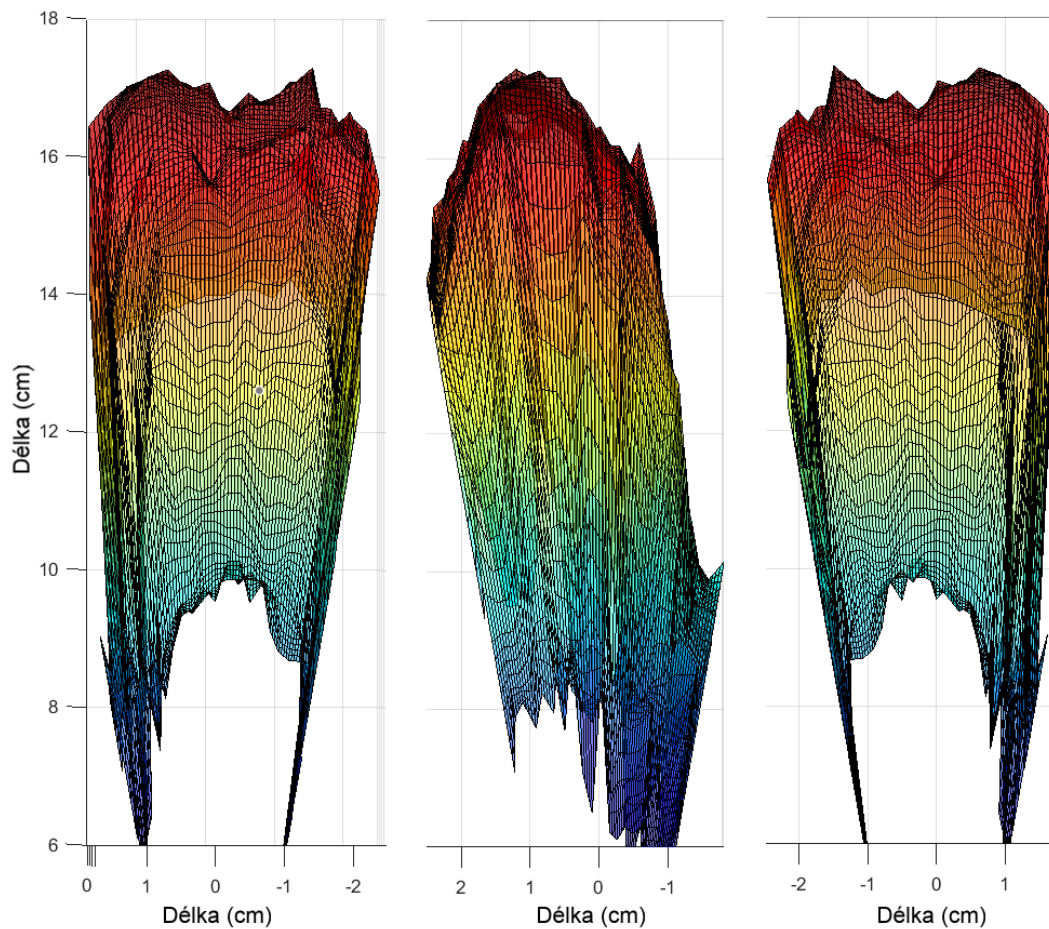


Obrázek 5.20: Sken molitanového fantomu děložního hrdla senzorem ToF (řez)

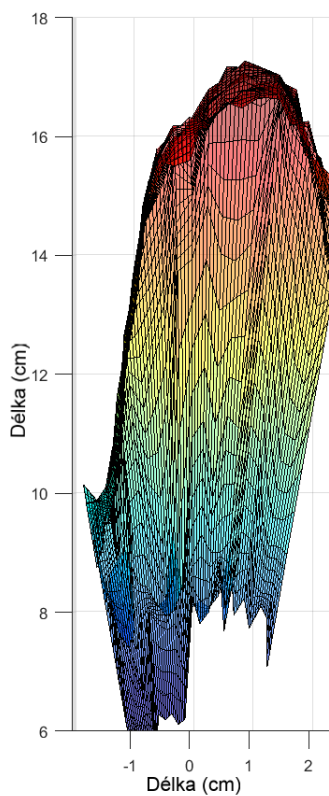


Obrázek 5.21: Sken molitanového fantomu děložního hrdla senzorem Lidar (řez)

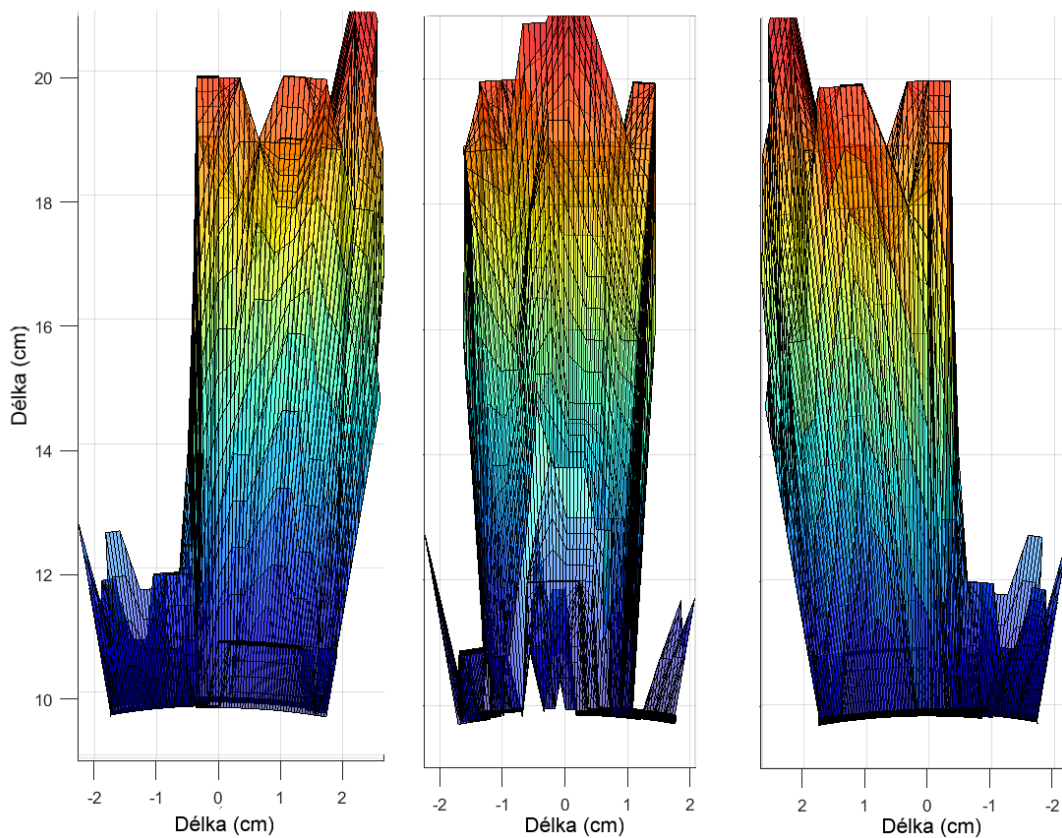
Na obrázku 5.22 je vidět sken masového fantomu děložního hrdla senzorem ToF. Na obrázku je vidět boční pohled z několika úhlů. Na obrázku 5.23 je následně vidět řez nasnímaným modelem. Dále je na obrázku 5.24 vidět sken masového fantomu děložního hrdla senzorem Lidar z několika úhlů. Na obrázku 5.25 je následně vidět řez nasnímaným modelem.



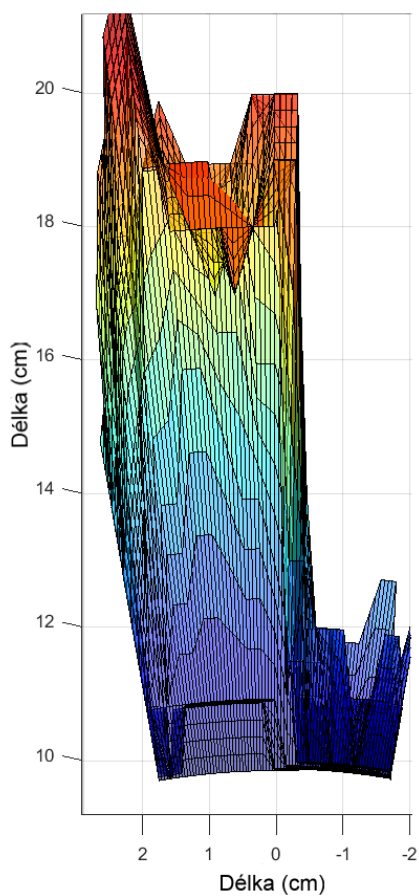
Obrázek 5.22: Sken masového modelu děložního hrdla senzorem ToF z různých úhlů



Obrázek 5.23: Sken masového fantomu děložního hrdla senzorem ToF (řez)

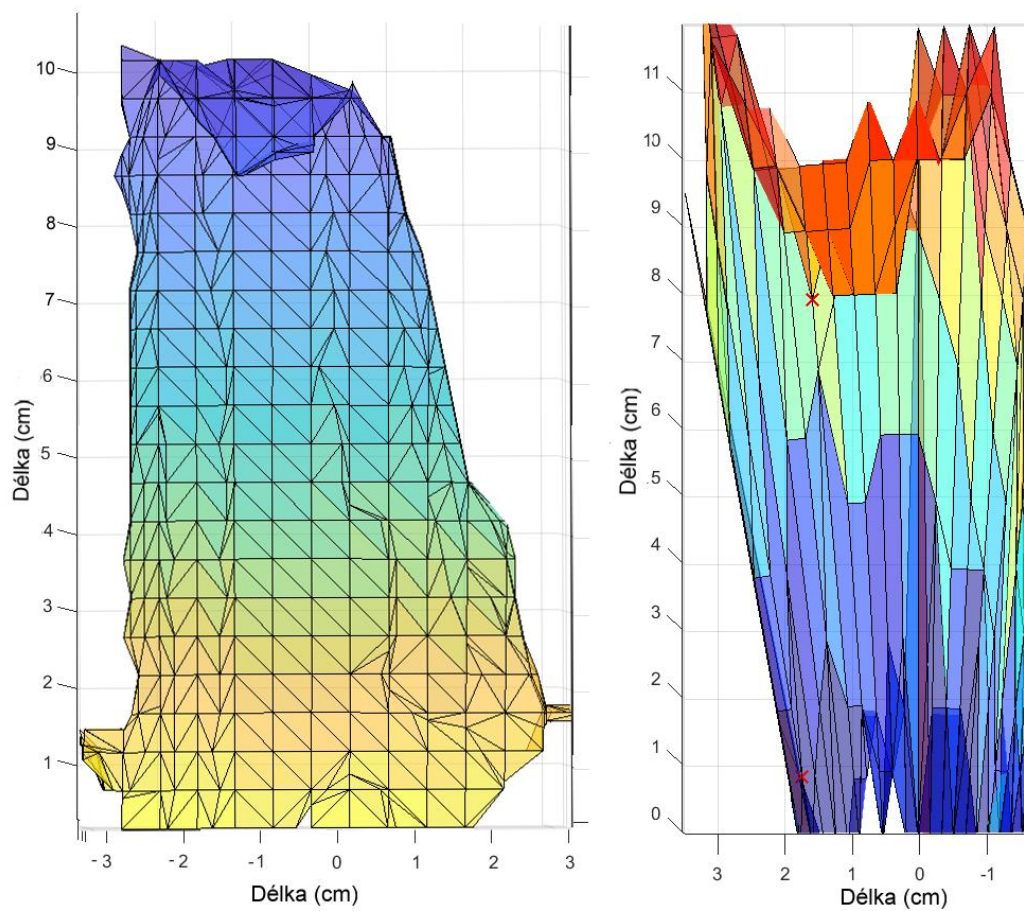


Obrázek 5.24: Sken masového modelu děložního hrdla senzorem Lidar z různých úhlů



Obrázek 5.25: Sken masového fantomu děložního hrdla senzorem Lidar (řez)

Na obrázku 5.26 je uvedeno srovnání senzoru Lidar se senzorem používaným přístroji Apple. Snímání bylo provedeno na plastovém modelu Obrázek 4.13 B.



Obrázek 5.26: Porovnání skenu ze senzoru Lidar se senzorem obsaženým v přístrojích Apple

6 Diskuse

Hlavním výstupem této bakalářské práce jsou data z navržených a sestrojených 3D skenerů, které využívají senzory ToF a Lidar. Na těchto skenerech byla vyhodnocována jejich vhodnost pro použití při skenování děložního hrdla na principu odrazu světla.

Jako zásadní problém pro konstrukci skenerů se projevilo rozpohybování senzorů, které měří pouze statickou vzdálenost od překážky. V našem případě byly senzory umístěny na plastovém držáku, který se pohyboval pomocí servo motorů. Celé měření je tedy limitováno krokem těchto motorů. Ty při malých krocích o jeden stupeň nedokáží udělat zcela přesný pohyb a dojde k mírnému roztřesení. Při nastavení většího kroku motory sice vykonají přesnější pohyb, ale nedojde k úplnému pokrytí skenované oblasti dostatečným množstvím dat. Řešením by bylo použít přesnější krokové motory s malým úhlem kroku, ty jsou ale zpravidla větší, což je pro měření v malých prostorech nevhodné. Také by toto řešení vyžadovalo složitý návrh a konstrukci držáku např. na 3D tiskárně, protože držáky na větší motory nejsou na trhu dostupné.

Použitý držák zprostředkující pohyb motorů také není ideální. Spodní motor nese celou hmotnost držáku bez opory, což je podpořeno nesymetrickým umístěním motorů. Toto uspořádání působí velkou pákou na osu spodního motoru a tím ještě více zvětšuje chybovost kroku motoru. Mimo to se způsobenou excentricitou celý držák rozechvívá. Některé dražší senzory typu Lidar, řeší daný problém pohybu pomocí rotace kolem své osy dokola v rozmezí 360° , avšak dochází ke snímání pouze v jedné rovině. Tudíž, kdybychom využili tento systém, museli bychom zavést snímání ve 3. směru, což by značně ztížilo snímání skenerem. Nejdražší systémy využívají metody vychylování paprsku, což je pro naše testovací měření zbytečné.

Dále jsme získali výsledky měření jednotlivými senzory. Senzor ToF měří s přesností na milimetry. Jeho přesnost se potvrdila při statickém měření vzdálenosti od překážky, kdy zobrazoval s velmi malými odchylkami. Avšak tato přesnost se neprojevila při 3D snímání, kdy snímáný předmět zobrazil ve velmi hrubých rysech (viz graf 5.1 a tabulka 5.1).

Senzor Lidar, ač měří s přesností na centimetry, dokázal mnohem lépe zobrazit snímáný předmět ve 3D, ale výrazně se při snímání projevuje jeho limitace s rozlišením (viz tabulka 5.2). V technických parametrech je uvedeno, že minimální vzdálenost pro měření je 30 cm, avšak při dobrých vnitřních podmínkách fungoval senzor již od 10 cm. Velkým problémem je propojovací kabel, který se připojuje přímo k senzoru. Kvůli tuhosti jednotlivých drátů dochází i při malém pohybu vodičů k pohybu v konektoru, což má za následek přerušování signálu do počítače a ukončení skenování. Tento problém se při statickém měření vzdáleností neprojevuje, ale u 3D snímání, kdy jsou využity servo motory k otáčení, k němu dochází velmi často. Řešením bylo

upevnění drátů k držáku servo motorů, čímž se zmenšil pohyb konektoru. Dalším problémem, který způsoboval časté ukončení v průběhu skenování bylo pravděpodobně špatně navázané spojení mezi senzorem a počítačem, kdy nedošlo k přenosu veškerých dat. V takovém případě nemohla být určena vzdálenost, což způsobilo zacyklení systému. Tato chyba nebyla závislá na kabelu, takže byla nejspíše způsobena špatným výstupem ze senzoru nebo přímo v počítači. Protože senzor ToF využívá jiné rozhraní, nemůžeme ho použít jako ověřovací vzorek pro určení problémové části. Řešení bylo provedeno úpravou kódu, do kterého byla přidána podmínka pro potvrzení získání kompletních dat.

Společným problémem obou senzorů je široký kužel světla, který když dopadne na hranu, dojde k zprůměrování hodnot a ke zkreslení. U senzoru Lidar výrobce uvádí 2°, což pro měření na vzdálenost 20 cm tvoří téměř třičtvrtě centimetru. Tento nežádoucí jev byl částečně zmírněn u senzoru Lidar přidáním malé clonky, která zužovala kužel světla. Avšak při malých vzdálenostech není zúžení tak zásadní, takže rozdíl není příliš rozeznatelný. U senzoru ToF nelze provést stejnou úpravu, protože to z konstrukčního hlediska není možné. Obdobná úprava nevyžadující využití clonky by mohla být provedena například pomocí čočky, která by zaostřila kužel světla.

Nasnímaná data byla po naskenování převáděna z Raspberry Pi do prostředí Matlab, kde byla následně upravena a zobrazena. Samotný Matlab nemá dokonale přizpůsobené prostředí pro zobrazování 3D skenů, protože je primárně určeno pro jiné účely mimo jiné například pro zobrazení 3D grafů. Této funkce je využíváno pro zobrazování skenů v našem případě, což se projevuje nedokonalým prostředím a zobrazováním. Problematika zobrazení je v rámci této práce umocněna zobrazováním 3D struktur ve 2D, což zhoršuje prezentaci výsledků. Získaná data by mohla být zobrazena již na samotném Raspberry Pi, ale programovací jazyk Python neumožňuje tak snadné a velké množství úprav jako námi použitý Matlab. To činí z Matlabu vhodnější a uživatelsky přívětivější prostředí pro práci s nasnímanými daty.

Dále můžeme porovnat sken ze senzoru Lidar, který obsahuje výše zmíněné nepřesnosti a limitace se skenem z přístroje iPhone. Jelikož jde o komerčně dostupný přístroj, můžeme předpokládat, že se nebude jednat o tak kvalitní senzor jako ty využívané v průmyslových odvětvích. Tento skener pracuje na principu, kdy je pohyb senzoru zajištěn uživatelem a složitý software vytváří „mračno bodů“, takže není nutné pohybovat přístrojem v přesně daných souřadnicích. Tím odpadá problematika pohybového mechanismu jako je tomu v případě našeho skeneru a nemusí se využívat složitěho konstrukčního řešení s krokovými motory způsobující mnoho nepřesností. I přesto je náš sken ze senzoru Lidar a sken z iPhone srovnatelný, takže můžeme říci, že se skener podařilo sestavit správně.

Výstupy ze skenerů jasně ukazují, že senzory ToF i Lidar dokáží při statickém zobrazování zachovat přibližnou přesnost (graf 5.1). K rozdílům dochází při snímání v pohybu, kdy senzor Lidar zobrazoval snímání povrch s přesností omezenou jeho

parametry, zatímco senzor ToF nebyl schopný rozeznat ani výrazné změny skenovaných povrchů (tabulka 5.1 a 5.2). Pro každý materiál musela být provedena před měřením kalibrace, aby při následném zobrazení nedocházelo k posunu. Odlišné hodnoty posunu pro různé materiály jsou způsobeny různou odrazivostí světla daných materiálů a povrchů. Skenování se senzorem Lidar nám ukázalo, že nejpřesněji probíhá měření na plastu a nejhůře na polystyrenu, kde dochází k roztržení obrazu. U molitanu a dřeva dochází k mírnému roztažení naskenovaného modelu. Nejbližší tkáni děložního hrdla je masový model. V jeho případě neznáme přesné parametry jako u ostatních modelů, ale můžeme říci, že na základě výsledků sken odpovídá hrubým rozměrům modelu.

Rozlišovací schopnost celého systému se nejlépe prověřila na šachovnicových modelech z plastu, kde můžeme pozorovat limitace celého systému. Ty se projeví hlavně při snímání ostrých hran, které skener není schopen rozeznat, protože dochází ke snímání pouze z jednoho bodu. Právě kvůli snímání z jednoho bodu se paprsek světla zastaví o hranu a vytváří pod ní stínovou oblast, která se poté jeví jako sešikmení rovných stran. Tyto stíny, které jsou na šachovnicových modelech extrémní, způsobují, že dochází k zobrazení pouze pár výstupků a celý obraz je zatížen větší chybou. I přesto se podařilo nasnímat i některé body na šachovnici s délkou hrany 0,5 cm na správném místě, avšak jejich velikost neodpovídá. Se senzorem Lidar u šachovnic s délkou hrany 1 a 2 cm se podařilo naskenovat výstupky, které přibližně odpovídají skenovanému modelu. U ostatních skenování došlo k nasnímání pouze bodů, které se přibližně blíží místům, kde by se měly vyskytovat výstupky. U těchto snímání však nepoznáme, zda skener opravdu narazil na výstupek nebo se jedná o chybu.

Celkově je metoda skenování na základě odrazu světla zatížená chybou stejně, ne-li více než ostatní metody založené na základě odrazu, jako je například ultrazvuk nebo radar. Při velmi krátkých vzdálenostech dochází k rychlému odrazu, a tudíž jsou časy velmi krátké.

7 Závěr

Pro studium vhodnosti využití metody skenování na základě odrazu světla při operacích děložního hrdla byly navrženy a sestaveny dva skenery se senzory ToF (VL53L1X) a Lidar (TFMini-S). Ovládání celého systému skenerů a následný výstup dat byl prováděn pomocí minipočítače Raspberry Pi. Výstupní data byla poté finálně upravena a zobrazena v prostředí Matlab. Sestavené skenery byly testovány na různých modelech, mimo jiné na fantomech z různých materiálů – plast, polystyren, molitan a dřevo, které byly navrženy tak, aby tvarově simulovaly zjednodušený model děložního čípku. Finální měření bylo provedeno na modelu snímané anatomie z masa, jenž svými rozměry odpovídal skutečnosti.

Z výsledků je patrné, že lépe pracoval senzor Lidar, který dokázal zobrazit přesněji skenovaný obraz již z 10 cm a je tedy vhodnější pro další využití. Výrobce u senzoru Lidar uvádí přesnost měření ± 6 cm, což také odpovídá našemu měření až na polystyrenový model, kde může být jiná odrazivost materiálu. Senzor ToF zobrazoval pouze velmi hrubé tvary. Měření prokázalo, že je závislé na skenování různých povrchů a vždy musí proběhnout kalibrace pro daný materiál.

Ze skenu masového modelu pomocí senzoru Lidar můžeme říci, že tvar modelu přibližně odpovídá skenu. Ale malé rozlišení senzoru neumožňuje určit přesnější rozměry, což je pro operace děložního hrdla zásadní.

V rámci hlubšího zkoumání by bylo vhodné využít lepší a přesnější senzory typu Lidar, které by mohly dosáhnout lepších výsledků. Avšak i tyto senzory budou mít limitace v oblasti snímání malých vzdáleností ve stísněných prostorech.

Seznam použité literatury

- [1] Rakovina děložního čípku. *Rakovina děložního čípku* [online]. [cit. 2022-01-06]. Dostupné z: <https://nsc.uzis.cz/zdravycipek/index.php?pg=rakovina-delozniho-cipku>
- [2] ČERMÁK, Jan. METODY 3D SKENOVÁNÍ OBJEKTŮ. Brno, 2015. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce ING. TOMÁŠ MARADA, PH.D.
- [3] Průvodce 3D skenery: jaké jsou jejich výhody a nevýhody? Toner partner [online]. [cit. 2021-10-17]. Dostupné z: <https://www.tonerpartner.cz/clanky/pruvodce-3d-skenery-jake-jsoujejich-vyhody-a-nevyhody-25287cz39332/>
- [4] 3D skener. Wikipedia [online]. [cit. 2021-10-18]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/3D_skener
- [5] Introduction to 3D Scanning [online]. [cit. 2021-10-18]. Dostupné z: <http://mesh.brown.edu/3DP-2012/pdfs/3DP-2011-lecture-2.pdf>
- [6] KOTEK, Lukáš. Zubní 3D skener. Brno, 2015. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Jaroslav Balogh.
- [7] Využití 3D skenování v lékařství [online]. [cit. 2021-10-17]. Dostupné z: <https://www.skenovanive3d.cz/skenovani/kde-skener-vyuzit/lekarstvi/>
- [8] KONVALINKOVÁ, M. a M. KOTOVÁ. 3D skenery v ortodoncii. *Česká stomatologie Praktické zubní lékařství*. 2018, 2018(1), 13-24
- [9] 3D/4D ultrazvuk. GynCare [online]. [cit. 2022-04-30]. Dostupné z: <https://www.gyncare.cz/3d-4d-ultrazvuk/>
- [10] GRIM, Miloš a Rastislav DRUGA. *Základy anatomie 3*. Praha: Galen, 2005
- [11] *Děložní hrdlo* [online]. [cit. 2022-01-07]. Dostupné z: <https://www.nzip.cz/rejstrikovy-pojem/1706>
- [12] *Organs of the Genital System and their Neurovasculature* [online]. [cit. 2022-01-07]. Dostupné z: <https://basicmedicalkey.com/organs-of-the-genital-system-and-their-neurovasculature/>
- [13] *CO ZPŮSOBUJE RAKOVINU DĚLOŽNÍHO ČÍPKU A JAK SE JÍ BRÁNIT?* [online]. [cit. 2022-01-07]. Dostupné z: <https://kont.zsf.jcu.cz/pdfs/knt/2011/01/13.pdf>
- [14] *HPV virus* [online]. [cit. 2022-01-07]. Dostupné z: <https://www.lekarna.cz/clanek/hpv-virus/>
- [15] VÁGNEROVÁ, Jana. *Rakovina děložního čípku a možnosti prevence*. Brno, 2019. Diplomová práce. Masarykova Univerzita. Vedoucí práce MVDr. Mgr. Monika Dušková, Ph.D.
- [16] Cooper DB, Carugno J, Menefee GW. Conization Of Cervix. 2021 Jul 31. In: StatPearls [ITreasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2021 Jan–. PMID: 28722875
- [17] Přehled diagnostiky a léčby karcinomu děložního hrdla. *Onkologie*. 2014, 8(6), 269-274.
- [18] *Konizace a předčasné porody* [online]. [cit. 2022-01-07]. Dostupné z: <https://zdravi.euro.cz/clanek/postgradualni-medicina/konizace-a-predcasne-porody-463806>
- [19] SEIDLOVÁ, Kateřina. *Analýza konizátu po operaci děložního hrdla z hlediska objemu, tvaru a rozměrů in vitro*. Kladno, 2019. Diplomová práce. ČVUT v Praze. Vedoucí práce doc. Ing. Jiří Hozman, Ph.D.
- [20] CARCOPINO, Xavier, Julien MANCINI, Walter PRENDIVILLE et al. The Accuracy of Large Loop Excision of the Transformation Zone Specimen Dimensions in Determining Volume. *Journal of Lower Genital Tract Disease* [online]. 2017, 21(2), 120-124 [cit. 2022-01-07]. DOI:

- 10.1097/LGT.0000000000000283. ISSN 1089-2591. Dostupné z:
<http://Insights.ovid.com/crossref?an=00128360-201704000-00007>
- [21] Radu Horaud, Miles Hansard, Georgios Evangelidis, Clément Ménier. An Overview of Depth Cameras and Range Scanners Based on Time-of-Flight Technologies. *Machine Vision and Applications*, Springer Verlag, 2016, 27 (7), pp.1005-1020. ff10.1007/s00138-016-0784-4ff. ffhal-01325045
- [22] DROZD, Stanislav. *Riadiaca jednotka ToF kamery*. Praha, 2018. Diplomová práce. ČVUT v Praze. Vedoucí práce Ing. Jan Tomlain
- [23] Time-of-FlightCamera–AnIntroduction. [online]. [cit. 2022-01-07] Dostupné z:
<http://www.ti.com/lit/wp/sloa190b/sloa190b.pdf>.
- [24] DELLEPIANE, Matteo. Acquiring 3D shape [online]. [cit. 2021-10-17]. Dostupné z:
http://vcg.isti.cnr.it/~ganovell/bertinoro/L2_RM_creation.pdf
- [25] *Datasheet - production data VL53LIX* [online]. [cit. 2022-01-07]. Dostupné z:
<https://dratek.cz/docs/produkty/1/1179/vl53l1x.pdf>
- [26] *LIDAR senzor a jeho aplikace v mobilním robotu*. Praha, 2021. Diplomová práce. ČVUT v Praze. Vedoucí práce Ing. Vojtěch Petrucha, Ph.D.
- [27] *TFmini-S LiDAR (ToF) laserový senzor pro měření vzdálenosti* [online]. [cit. 2022-01-07]. Dostupné z:
<https://rpishop.cz/senzory/3520-tfmini-s-lidartof-laserovy-senzor-pro-mereni-vzdalenosti.html>
- [28] *Raspberry Pi 4 Model B - 8GB RAM* [online]. [cit. 2022-01-07]. Dostupné z: <https://rpishop.cz/raspberry-pi-4b/2611-raspberry-pi-4-model-b-8gb-ram-0765756931199.html>
- [29] *GPIO Pinout diagram* [online]. [cit. 2022-01-07]. Dostupné z: <https://www.the-diy-life.com/gpio-pinout-diagram-2/>
- [30] *Servo Motor 9g SG90 3.0V~7.2V* [online]. [cit. 2022-01-07]. Dostupné z: <https://dratek.cz/arduino/5461-servo-motor-9g-sg90-3.0v-7.2v.html>
- [31] Sférická soustava souřadnic. *Wikipedia: Otevřená encyklopedie* [online]. [cit. 2022-04-30]. Dostupné z:
https://cs.wikipedia.org/wiki/Sf%C3%A9rick%C3%A1_soustava_sou%C5%99adnic
- [32] Vyzkoušejte si, jak funguje LiDAR u nových iPhoneů 12 Pro na vlastní kůži. *Jablíčkář* [online]. 3.11.2020 [cit. 2022-04-30]. Dostupné z: <https://jablickar.cz/vyzkousejte-si-jak-funguje-lidar-u-novych-iphonu-12-pro-na-vlastni-kuzi/>
- [33] How to Use LiDAR on Your iPhone 13 Pro and Pro Max. *TechNadu* [online]. 19.9.2021 [cit. 2022-04-30]. Dostupné z: <https://www.technadu.com/how-to-use-lidar-on-iphone-13/302424/>
- [34] 3D SCANNING FOR HEALTHCARE [online]. [cit. 2022-05-01]. Dostupné z:
https://occipital.com/#product_module_

Příloha A: Kód pro získávání dat – senzor ToF

Ukázka kódu pro získávání dat ze senzoru ToF. Kód je sepsán v programovacím jazyce Python.

```
from PiicoDev_VL53L1X import PiicoDev_VL53L1X
from time import sleep
from gpiozero import Servo
import math
from gpiozero.pins.pigpio import PiGPIOFactory

distSensor = PiicoDev_VL53L1X()
factory = PiGPIOFactory()

servo1 = Servo(12, min_pulse_width=0.5/1000,
max_pulse_width=2.5/1000, pin_factory=factory)
servo2 = Servo(13, min_pulse_width=0.5/1000,
max_pulse_width=2.5/1000, pin_factory=factory)

rot_start_ser1 = 169 #90
rot_end_ser1 = 190 #271

rot_start_ser2 = 169 #160
rot_end_ser2 = 190 #200

with open("vystup1.txt", 'x') as f:
    for j in range(rot_start_ser2, rot_end_ser2):
        sensor_values = []
        servo2.value = math.sin(math.radians(j))
        for i in range(rot_start_ser1, rot_end_ser1):
            servo1.value = math.sin(math.radians(i))
            sleep(0.2)
            distance = distSensor.read()
            sensor_values.append(str(distance))
            print(distance)
        f.write(' '.join(sensor_values) + '\n')
```

Příloha B: Kód pro získávání dat – senzor Lidar

Ukázka kódu pro získávání dat ze senzoru Lidar. Kód je sepsán v programovacím jazyce Python.

```
import serial
import time
from time import sleep
from gpiozero import Servo
import math

from gpiozero.pins.pigpio import PiGPIOFactory
factory = PiGPIOFactory()

servo1 = Servo(12, min_pulse_width=0.5/1000,
max_pulse_width=2.5/1000, pin_factory=factory)
servo2 = Servo(13, min_pulse_width=0.5/1000,
max_pulse_width=2.5/1000, pin_factory=factory)
ser = serial.Serial("/dev/ttyS0", 115200)

def getTFminiData():
    if ser.is_open == False:
        ser.open()
    count = 0
    cnt = 0
    while(count <= 8):
        cnt = cnt + 1
        try:
            count = ser.in_waiting
            print('#####')
            if cnt > 100:
                return -1
        except IOError:
            return -1
            print('Invalid value '+ str(count))

    try:
        recv = ser.read(9)
    except:
        return -1
    ser.reset_input_buffer()
    if recv[0] == 'Y' and recv[1] == 'Y': # 0x59 is 'Y'
        low = int(recv[2].encode('hex'), 16)
        high = int(recv[3].encode('hex'), 16)
        distance = low + high * 256
        return distance
    return getTFminiData()

rot_start_ser1 = 169 #90
rot_end_ser1 = 190 #271

rot_start_ser2 = 169 #160
rot_end_ser2 = 190 #200
```

```

with open("vystup.txt", 'w') as f:
    for j in range(rot_start_ser2, rot_end_ser2):
        sensor_values = []
        servo2.value = math.sin(math.radians(j))
        for i in range(rot_start_ser1, rot_end_ser1):
            servol.value = math.sin(math.radians(i))
            sleep(0.2)
            distance = -1
            while distance == -1:
                distance = getTFminiData()
                if distance == -1:
                    ser.close()
                    print(-1)
            sensor_values.append(str(distance))
            print(distance)
    f.write(' '.join(sensor_values) + '\n'

```

Příloha C: Kód pro úpravu dat

Kód sepsaný pro konečnou úpravu a zobrazení dat pro senzory ToF a Lidar v programovacím prostředí Matlab

```
clc
close all
clear

M=zeros(21); %tvorba prazdnych matic
x=M;
y=M;
z=M;

data = readmatrix('maso_7.txt'); %nacteni dat

data=flipud(data);
data=data+10; % kalibrace
filtr=23; % filtr odstraneni prilis vzdalenyh hodnot
filtrm=0;
rmin=1;
rmax=21;
for i=-10:10
    for j=-10:10
        z(j+11,i+11)=data(j+11,i+11)*(sind(j+90))*(cosd(i)); %
        prepocteni hodnot x,y,z
        x(j+11,i+11)=data(j+11,i+11)*(cosd(j+90));
        y(j+11,i+11)=data(j+11,i+11)*(sind(j+90))*(sind(i));

        if (z(j+11,i+11)>filtr) % uprava x, y, z pri aplikaci
        filtru
            z(j+11,i+11)=filtr;

x(j+11,i+11)=((z(j+11,i+11))/((sind(j+90))*(cosd(i))))*(cosd(j+90));

y(j+11,i+11)=((z(j+11,i+11))/((sind(j+90))*(cosd(i))))*(sind(j+90))*(sind(i));

        end
        if (z(j+11,i+11)<filtrm) % uprava x, y, z při aplikaci
        filtru
            z(j+11,i+11)=filtrm;

x(j+11,i+11)=((z(j+11,i+11))/((sind(j+90))*(cosd(i))))*(cosd(j+90));

y(j+11,i+11)=((z(j+11,i+11))/((sind(j+90))*(cosd(i))))*(sind(j+90))*(sind(i));

        end
    end
end
```

```

    end
end

x1=interp2(x,2);
y1=interp2(y,2); % interpolace
z1=interp2(z,2);

%plot3(x1(:,rmin:rmax),y1(:,rmin:rmax),z1(:,rmin:rmax),'b.');
```

%zobrazení mračna bodu

```

s=surf(x1(:,rmin:rmax),y1(:,rmin:rmax),z1(:,rmin:rmax),'edgecolor',
'r','black','edgeAlpha',0.6,'FaceAlpha',0.8,'FaceColor','g');
```

%colormap(white);

```

%colormap(colorcube(100)); %ruzne moznosti zobrazeni
colormap(jet(256));
```

xlabel('(cm)')

```

ylabel('(cm)')
zlabel('(cm)')
```

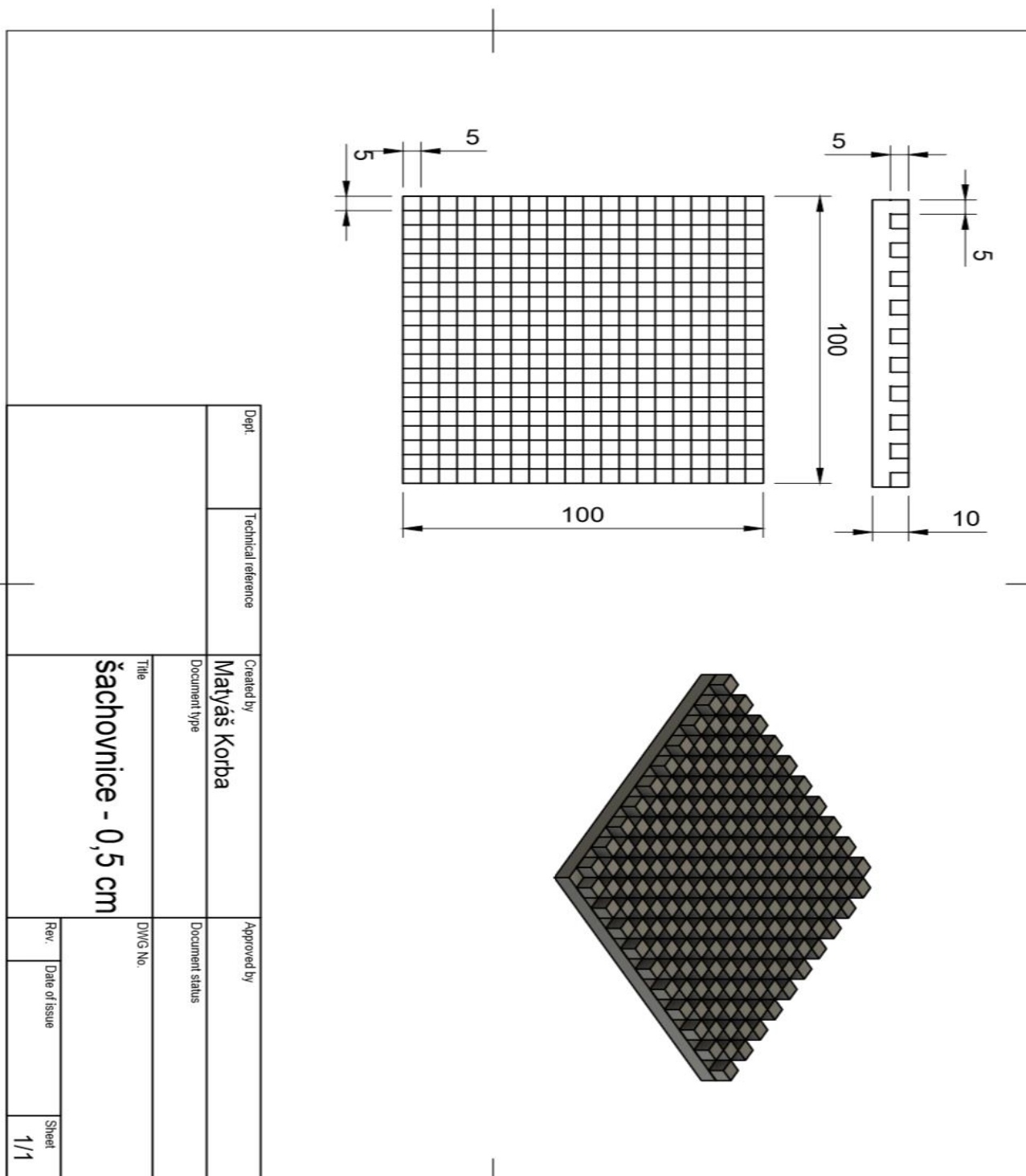
axis equal %parametry zobrazeni

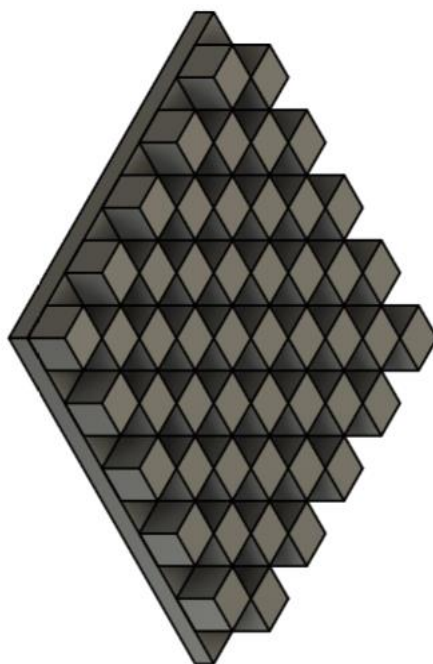
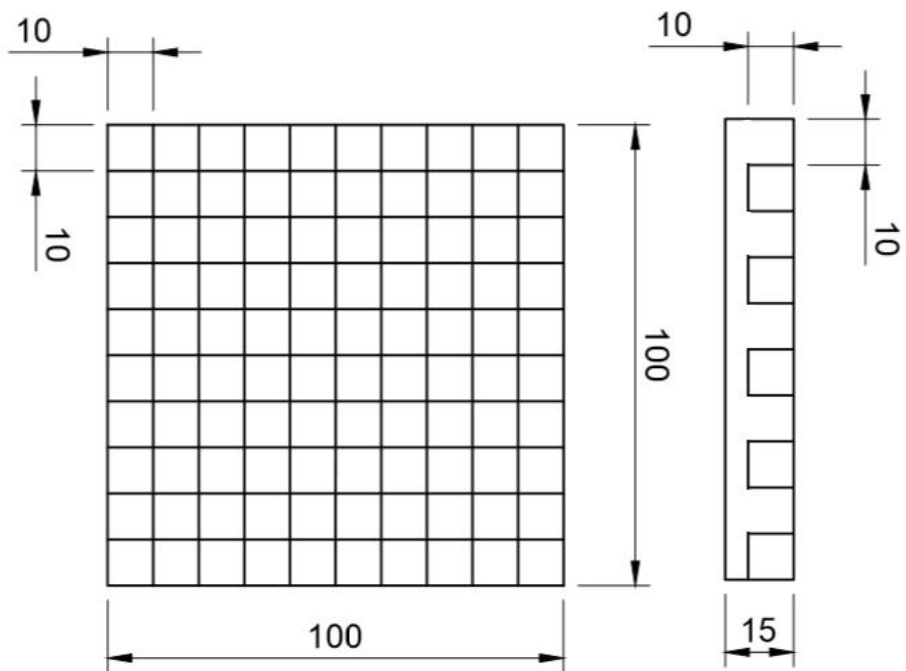
```

zticks(0:1:23);
zlim([9 21])
hold on
%light('Position',[0 6 8],'Style','local')
    plot3(x(1,1),y(1,1),0,'r*'); %označení levý horní roh
```

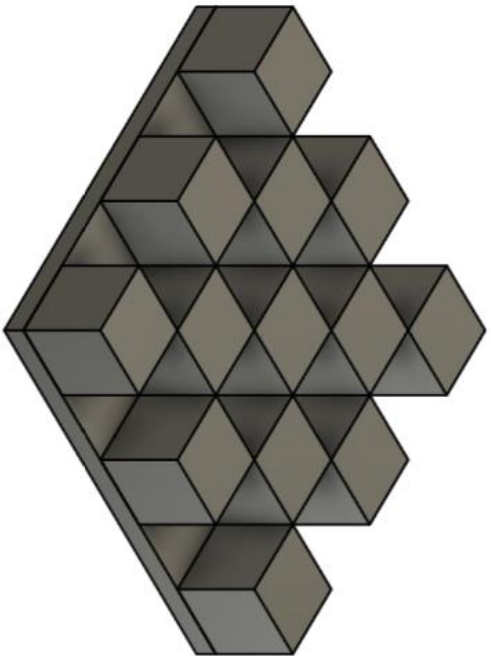
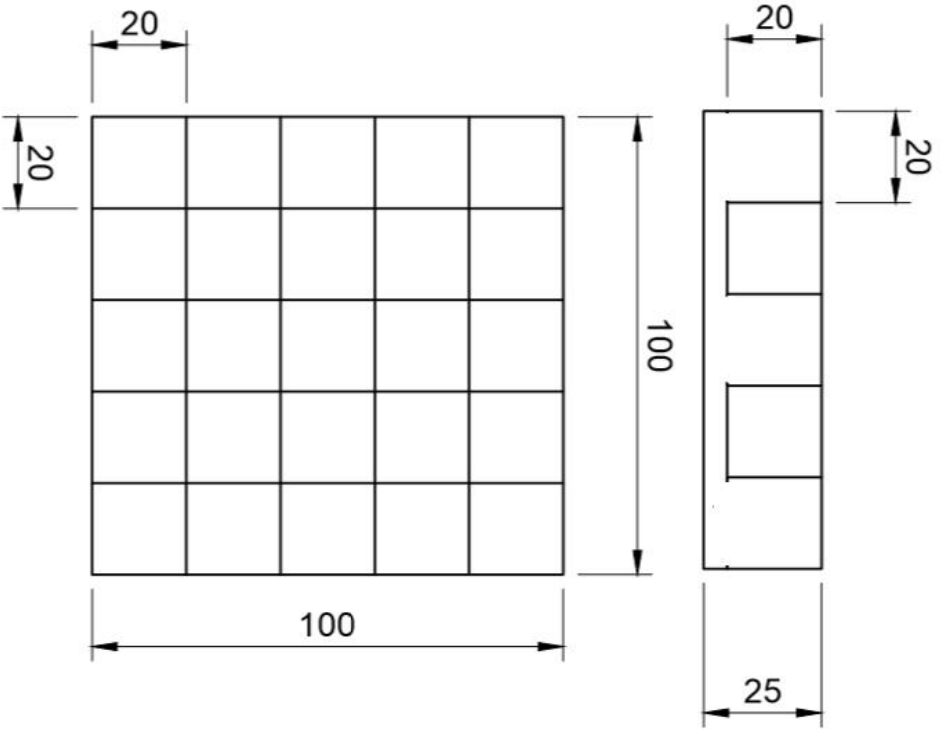
Příloha D: Výkresy šachovnicových modelů

Výkresy pro šachovnicové modely o délce hrany 0,5; 1 a 2 cm. Modelování fantomů probíhalo v programu Fusion 360.





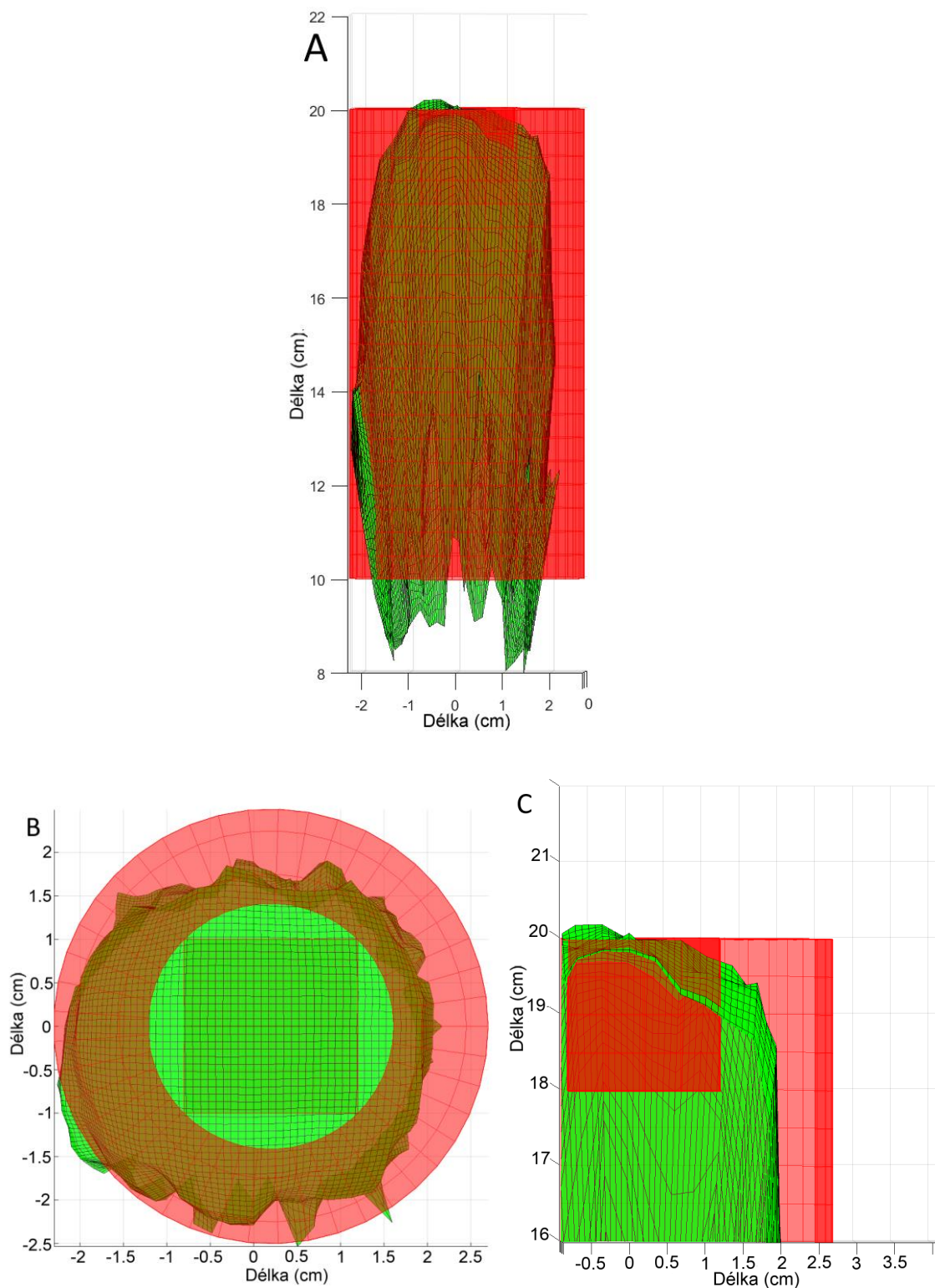
Dept:		Technical reference		Created by Matyáš Korba		Approved by	
				Document type		Document status	
		Title šachovnice - 1 cm		DWG No.			
Rev.		Date of issue		Sheet		1/1	



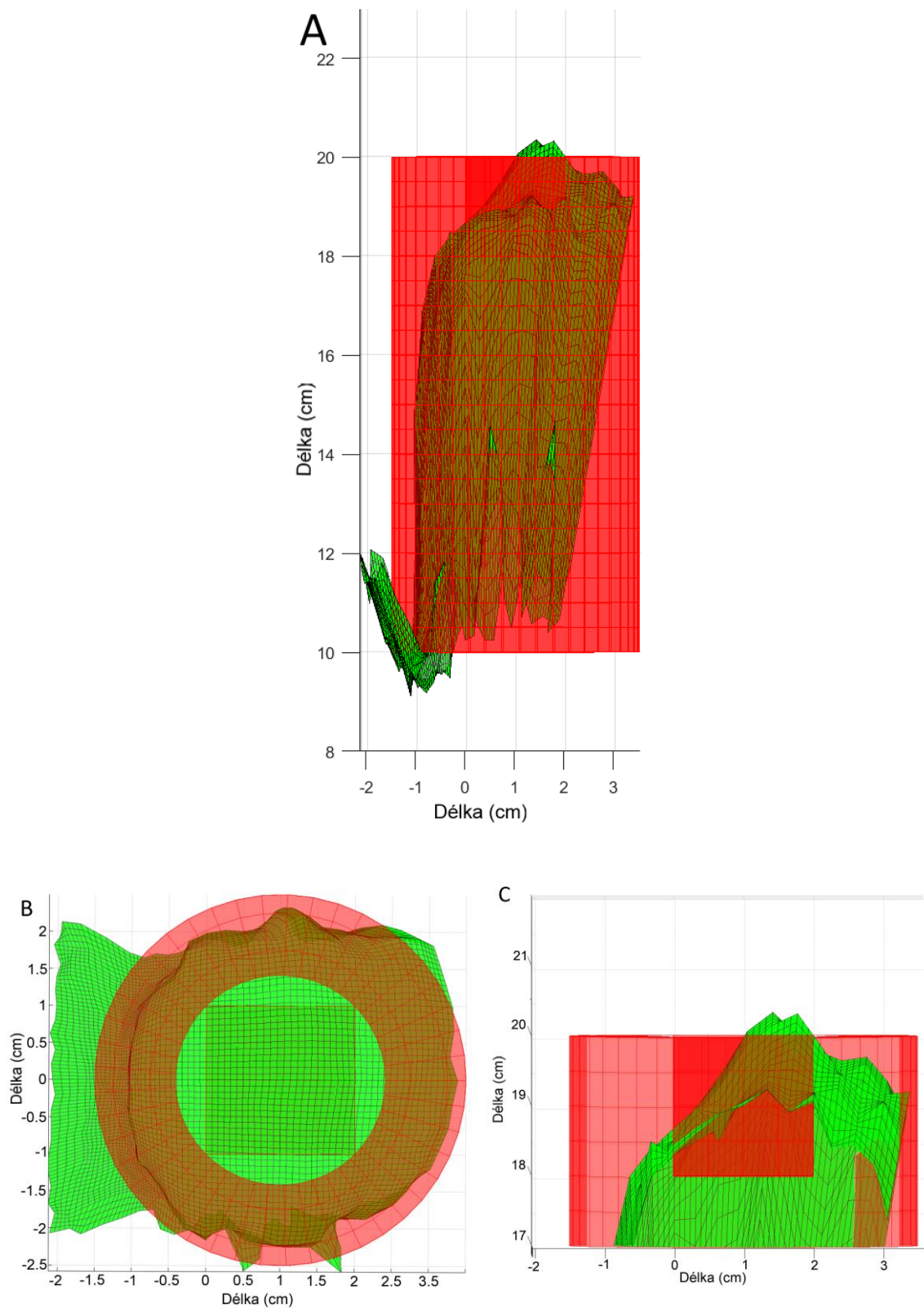
Dept:	Technical reference	Created by Matyáš Korba	Approved by
		Document type	Document status
Title šachovnice - 2 cm		DWG No.	
Rev.	Date of issue	Sheet	1/1

Příloha E: Skeny ze senzoru ToF

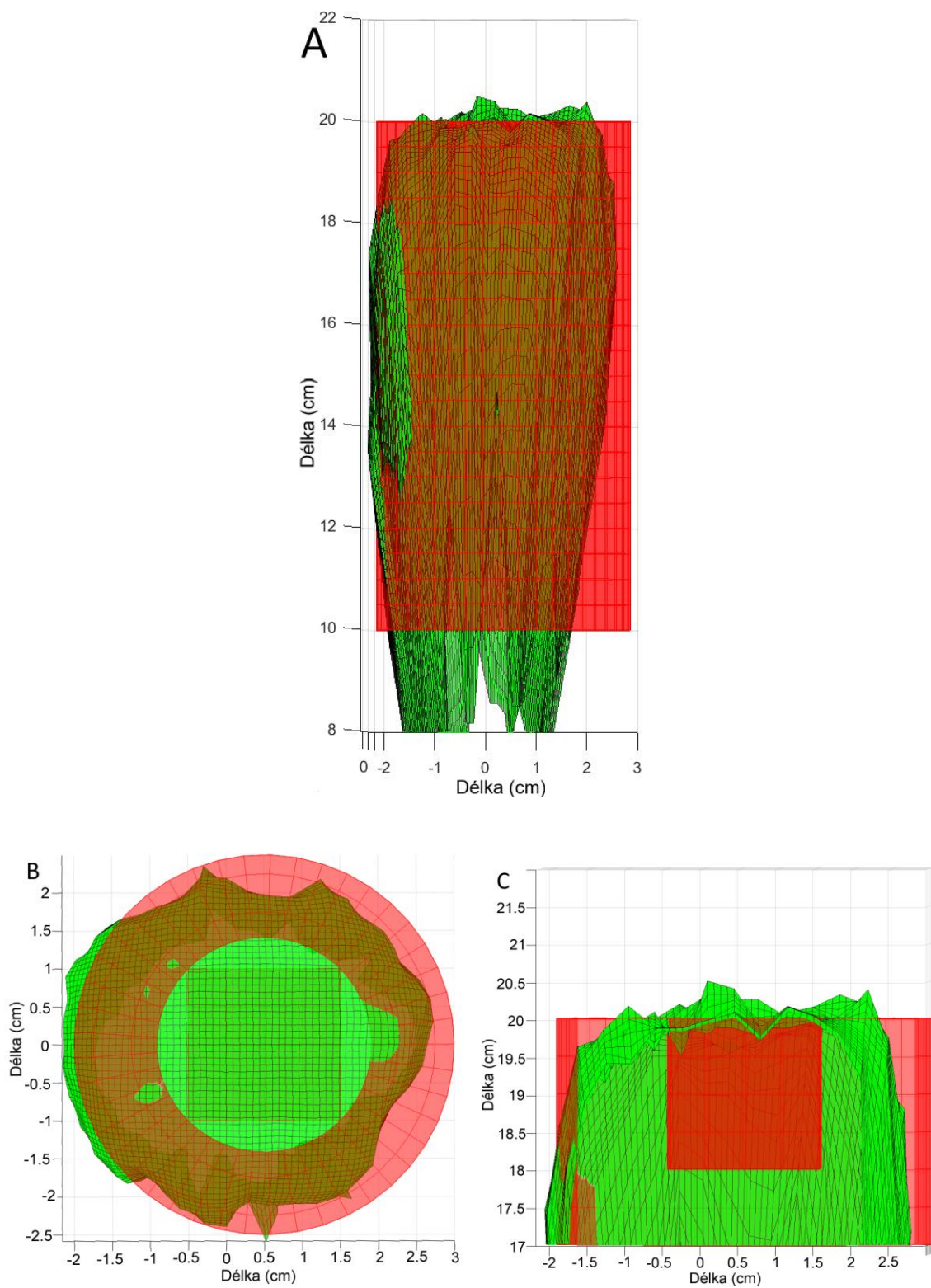
Porovnání skenů dřeva, molitanu a polystyrenu ze senzoru ToF se snímaným modelem.



Obrázek E.1: Porovnání skenu ze senzoru ToF s dřevěným modelem A) boční pohled B) horní pohled C) výřez děložního čípku



Obrázek E.2: Porovnání skenu ze senzoru ToF s molitanovým modelem A) boční pohled B) horní pohled C) výřez děložního čípku



Obrázek E.3: Porovnání skenu ze senzoru ToF s polystyrenovým modelem A) boční pohled B) horní pohled C) výřez děložního čípku