

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta strojního inženýrství

Ústav konstruování

Ing. Tomáš Koutecký

**AUTOMATICKÉ GENEROVÁNÍ POZIC
OPTICKÉHO SKENERU PRO DIGITALIZACI
PLECHOVÝCH DÍLŮ**

**AUTOMATIC GENERATION OF SCANNING
POSITIONS FOR SHEET METAL PARTS
DIGITIZATION**

Zkrácená verze PhD Thesis

Obor: Konstrukční a procesní inženýrství

Školitel: doc. Ing. Jan Brandejs, CSc.

Oponenti:

Klíčová slova

3D skenování, automatizace, plechové díly, automobilní průmysl, průmyslový robot, plánování snímání, osvětlovací model.

Key words

3D scanning, automation, sheet metal parts, automotive industry, industrial robot, sensor planning, reflectance model.

Místo uložení práce:

Oddělení pro vědu a výzkum FSI VUT v Brně.

OBSAH

1 ÚVOD.....	4
2 OPTICKÁ DIGITALIZACE A JEJÍ AUTOMATIZACE	5
2.1 Dělení digitalizačních metod.....	5
2.2 Popis metody proužkové projekce	5
2.3 Studie z oblasti automatizace přípravy pozic měření.....	7
2.4 Metody redukce odlesků	9
2.5 Osvětlovací modely.....	10
2.6 Analýza a zhodnocení poznatků získaných na základě rešerše	11
3 VYMEZENÍ CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE A NÁVRH ZPŮSOBU JEJÍHO ŘEŠENÍ.....	13
4 MATERIÁL A METODY	14
4.1 Návrh metodiky a její implementace v navrženém softwaru	14
4.2 Experimentální ověření navržené metodiky.....	21
5 ANALÝZA A INTERPRETACE ZÍSKANÝCH ÚDAJŮ	24
5.1 Srovnání ruční přípravy pozic robota a automatizovaného přístupu	24
5.2 Zhodnocení shody simulovaných pozic s reálnými	25
5.3 Zhodnocení shody naskenované plochy v simulaci a v měření	27
5.4 Zhodnocení zaznamenání polygonů segmentů	30
6 DISKUSE A VYPLÝVAJÍCÍ NÁVRHY NA OPTIMALIZACI.....	31
7 ZÁVĚR.....	34
8 SEZNAM LITERATURY	35
9 PUBLIKACE A PRODUKTY AUTORA.....	39
10 CURRICULUM VITAE.....	41

1 ÚVOD

Inspekce je proces, který se vyskytuje téměř ve všech oblastech lidské činnosti a během kterého se posuzuje, zda se daný produkt (objekt) odchyluje od zadaných specifikací [1]. K ověření splnění daných specifikací se využívají různé druhy měření, porovnání, testů a zkoušek. Inspekce může být kvalitativní nebo kvantitativní, posuzuje se, zda je produkt v očekávaném stavu (ano/ne; jak moc se od něj liší) nebo počtu.

V oblasti výroby strojních součástí se pak kromě vizuální kontroly myslí inspekci především kontrola dílů z hlediska dodržení požadovaných rozměrů a geometrie. K takové kontrole se používají nástroje a zařízení využívající dotyku s měřeným dílem: posuvná měřítka, hloubkoměry, elektronické mikrometry, úchylkoměry nebo zařízení pro měření souřadnic (CMM = Coordinate Measuring Machine). Nověji se používají zařízení obecně nazývaná skenery, která zjišťují měřené hodnoty bezkontaktně. Skenery pracují nejčastěji na principu promítání laserového paprsku nebo proužkového vzoru a snímání kamerou či více kamerami.

I když se dotykové nástroje a zařízení stále v hojné míře využívají, je patrný vzestup použití bezkontaktních inspekčních systémů. Důvodem je zejména jejich zvyšující se přesnost. U hlavního zástupce dotykových systémů, CMM, se udává přesnost v rozmezí (2,5 – 25) μm (dle [2]). U bezdotykových systémů je pak přesnost na této horní hranici nebo horší. Postupně se však přesnost těchto systémů zvyšuje. Dalším důvodem většího využití bezkontaktních systémů je podstatně větší rychlost, kterou měření probíhají. U CMM je dosahováno rychlostí do 60 bodů za minutu, u bezkontaktních systémů jsou to tisíce bodů získané během stejné doby. Výstupem jsou pak celé plochy na měřeném dílu, nejen diskrétní body jako u CMM. Dalšími výhodami u bezkontaktních systémů je jejich snadnější obsluha nebo možnost měřit i pružné materiály.

U všech tří zmíněných metod získání měřených dat probíhaly a probíhají snahy o automatizaci takových měření. Automatizace inspekce má za cíl zrychlit proces výroby a ověření nového dílu a tím celý proces zefektivnit a zlevnit. Zároveň se automatizací snižují časové nároky na obsluhu a tím dochází opět ke snižování nákladů. Inspekce však neznamená pouze získání měřených dat, ale také další kroky vedoucí k ověření zadaných specifikací. Výzkumu možností automatizace tedy podléhá jednak proces získání dat, ale zejména v posledních letech také procesy následující po získání dat, tedy registrace (sesouhlasení) navržených (CAD) a naměřených dat a vyhodnocení výsledků tohoto porovnání.

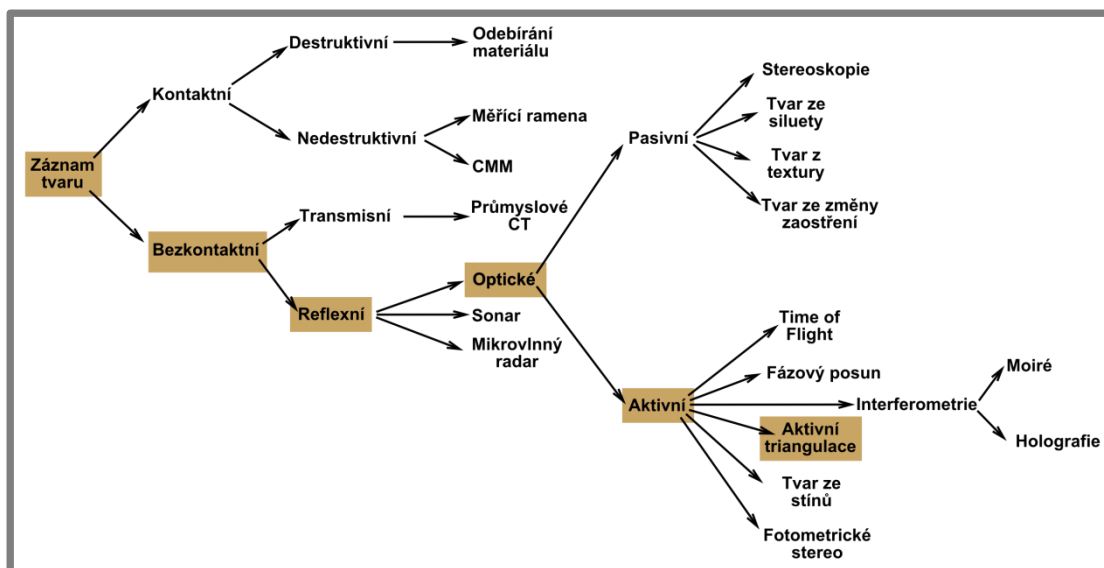
CAD data se pak nepoužívají jen při porovnávání této dvojice dat, ale jsou snahy o jejich využití při samotném inspekčním měření, pro jeho automatizaci tak, aby byly vygenerovány ideální dráhy nebo pozice pro proměření celého dílu nebo zadané části. Vývoj u jednotlivých metod (CMM, laserové skenery, světelné skenery) odpovídá jejich nasazení v praxi a době, po kterou se již používají. U CMM je plánování inspekce na základě CAD dat poměrně běžné a pro laserové skenery se v jisté míře také již využívají. Pro skenery využívající proužkové projekce však doposud existují jen některé studie řešící tuto problematiku.

2 OPTICKÁ DIGITALIZACE A JEJÍ AUTOMATIZACE

2.1 Dělení digitalizačních metod

Způsobů dělení digitalizačních metod, pomocí kterých je možné získat data pro inspekční měření, existuje celá řada. Jedním ze způsobů, který je uveden v [3], je dělení na základě velikosti měřeného objektu a zároveň požadované přesnosti. V tomto případě je uvedeno pouze dělení bezkontaktních metod měření. Jiným způsobem dělení, které tato kniha uvádí, je dělení na základě vlnové délky použité u daného senzoru. Jsou to metody využívající mikrovln, světelných nebo ultrazvukových vln.

Kniha [4] uvádí rozšířenější způsob dělení a to na metody kontaktní a bezkontaktní. Tyto metody pak rozčleňuje dále, jak je uvedeno na Obr. 2-1. Z vypsanych metod se v průmyslové praxi nejčastěji využívají z kontaktních CMM (Coordinate Measuring Machine = Zařízení pro měření souřadnic) a z bezkontaktních zařízení využívající metod aktivní triangulace. Na aktivní triangulaci je založena i metoda strukturovaného světla, kterou využívají laserové skenery a skenery s proužkovou projekcí. Vedle nich je v průmyslové praxi ještě široce využívaná pasivní triangulační metoda fotogrammetrie, v Obr. 2-1 uvedená jako stereoskopie. Tato práce se zaměřuje na metodu proužkové projekce, protože se jedná o metodu získávající v porovnání s ostatními metodami největší množství dat za stejný časový úsek.

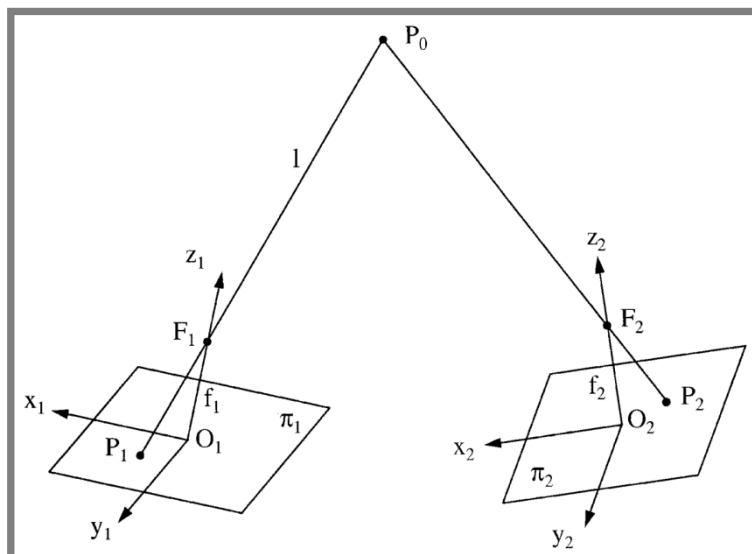


Obr. 2-1 Metody získání informace o tvaru objektu [4]

2.2 Popis metody proužkové projekce

Základem metody proužkové projekce je, stejně jako u laserového skeneru, triangulace a využití epipolární geometrie. Obr. 2-2 zobrazuje obrazové roviny dvou kamer (π_1 a π_2), jejichž pozice jsou známy. Body P_1 a P_2 jsou zobrazením obecného bodu v prostoru P_0 . F_1 a F_2 jsou body na osách z_1 a z_2 v ohniskové vzdálenosti kamery f_1 a f_2 . Uvažujme, že P_1 je projekce bodu P_0 podél přímky l do obrazové roviny π_1 . P_0 může být bod libovolně daleko na přímce l a pozice P_2 v π_2 není zřejmá. Je ale možné říct, že bod P_2 leží na průsečnici roviny π_2 a roviny tvořené body F_1 , F_2 a P_1 [5]. Přesnou pozici na této průsečnici je už nutné v případě

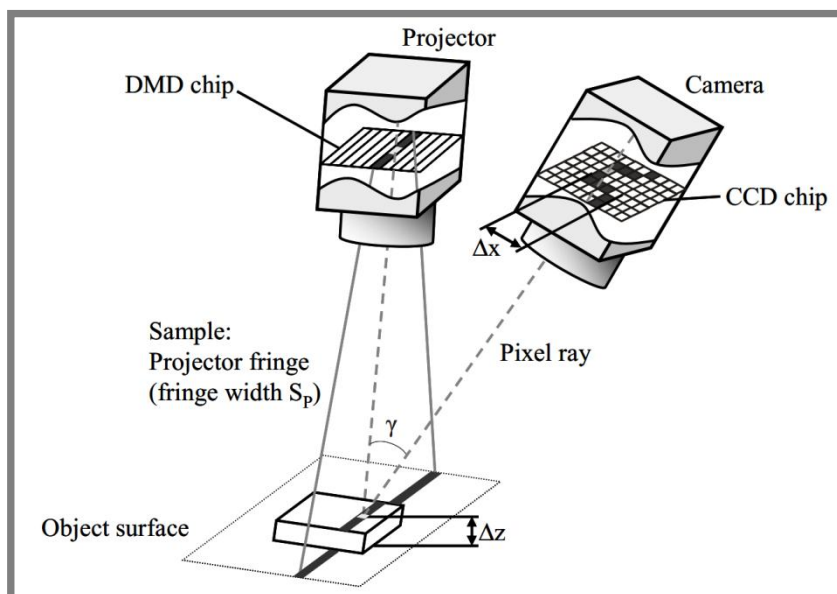
proužkové projekce určit pomocí některého z druhů kódování. Obdobný princip totiž funguje v případě, kdy je jedna kamera nahrazena projektorem, promítajícím známý vzor.



Obr. 2-2 Obecný vztah dvou optických senzorů [5]

Proces získání prostorových dat metodou proužkové projekce, v případě využití vzorů s fázovým posuvem, sestává z následujících kroků [6]:

1. Projekce strukturovaného světelného vzoru (viz Obr. 2-3)
2. Záznam fázově modulovaného promítaného vzoru kamerou
3. Výpočet fázové modulace analýzou obrazu
4. Rozbalení fáze pro získání souvislého fázového rozložení, které proporčně odpovídá změnám výšky objektu
5. Kalibrace systému pro převedení do skutečných 3D souřadnic



Obr. 2-3 Princip funkce proužkové projekce [34]

2.3 Studie z oblasti automatizace přípravy pozic měření

2.3.1 Příprava pozic měření u laserových skenerů

V sérii prací od Prieta a kolektivu [7], [8] a [9], autoři představují a postupně rozšiřují práci zabývající se nalezením optimálních pozic měření, aby byla zajištěna co nejnížší odchylka naměřených dat. Experimentálním měřením bylo zjištěno, že laserový skener poskytuje výsledky s nejnížší odchylkou při splnění požadavku na vzdálenost od měřeného dílu d 170 až 240 mm a úhlech sklonu skenovací hlavy α (-35 až 35)° a β (-15 až 15)°. Pozice jsou v první řadě generovány v kolmém pohledu k dané ploše. Pokud je zjištěna okluze nebo kolize, jsou vygenerovány nové pozice, které již nemusí být kolmé, ale nacházejí se v ideálním rozsahu úhlů a vzdálenosti. Při nalezení všech potřebných pozic je vypočítána odhadovaná přesnost skenovaných dat, která je funkcí vzdálenosti d a úhlů α a β . Při dostatečné přesnosti je možné provést měření. Z výsledků studie vyplývá, že navržená metoda přináší zvýšení přesnosti naměřených dat, v konkrétním případě testovacího měření 25 μm , což je pro inspekční úlohu značné zlepšení.

Autoři kolem Martinse uvedli metodu s odlišným přístupem k hledání pozic měření laserovým skenerem [10]. CAD model měřeného dílu převedli na voxelový model a zároveň využili polygonální model. Voxely jsou rozděleny na *vnitřní* a *povrchové*. Povrchové voxely jsou asociovány s trojúhelníky polygonální sítě. Hledá se takové řešení, aby byly navrženými pozicemi pokryty všechny povrchové voxely. Voxelový model zároveň sloužil ke kontrole kolizí při přejezdech skeneru.

Mahmud a kolektiv [11] se ve své práci snaží při hledání optimální cesty laserového skeneru zahrnout nejen vlastnosti a omezující parametry skeneru, ale také rozměrové a geometrické specifikace kontrolovaného dílu. Pro každý kontrolovaný prvek dílu je vypočítána přípustná nejistota měření spojená s předepsanými tolerancemi podle GPS (Geometrical Product Specifications = Geometrické specifikace produktu). Z této nejistoty vychází omezení dané přípustným úhlem mezi kontrolovanou plochou a laserovým paprskem. Z toho dále vychází počet reorientací skeneru pro daný prvek a celkové množství měřicích pozic. Omezením této práce je redukce skenovací roviny laserového svazku do jedné středové osy.

2.3.2 Automatizace přípravy pozic měření u skenerů s proužkovou projekcí

Studie zabývající se automatizací v případě použití skenerů s proužkovou projekcí se zaměřují na automatické generování pozic, ze kterých bude provedeno měření zadaného dílu takovým způsobem, aby mohly být provedeny požadované úkony inspekce. Konkrétně se různí autoři ve svých metodách a kompletních aplikacích zaměřují buď na návrh robustních řešení, která budou určena pro široké spektrum měřených objektů nebo na specifické druhy dílů, které vyžadují jasně definovaný přístup k měření.

Autoři Germani, Mengoni a Raffaelli se v sérii studií [12], [13], [14] a [15] zabývají právě návrhem robustního řešení, které je kompletním inspekčním řešením určeným pro kontrolu různých strojírenských dílů. Přístup, který ve svém řešení používají, lze shrnout do následujících bodů:

- vygenerování pokusných pozic
- simulace skenování z každé pokusné pozice
- odebrání a optimalizace neuspokojivých pozic
- vygenerování optimální cesty mezi jednotlivými pozicemi.

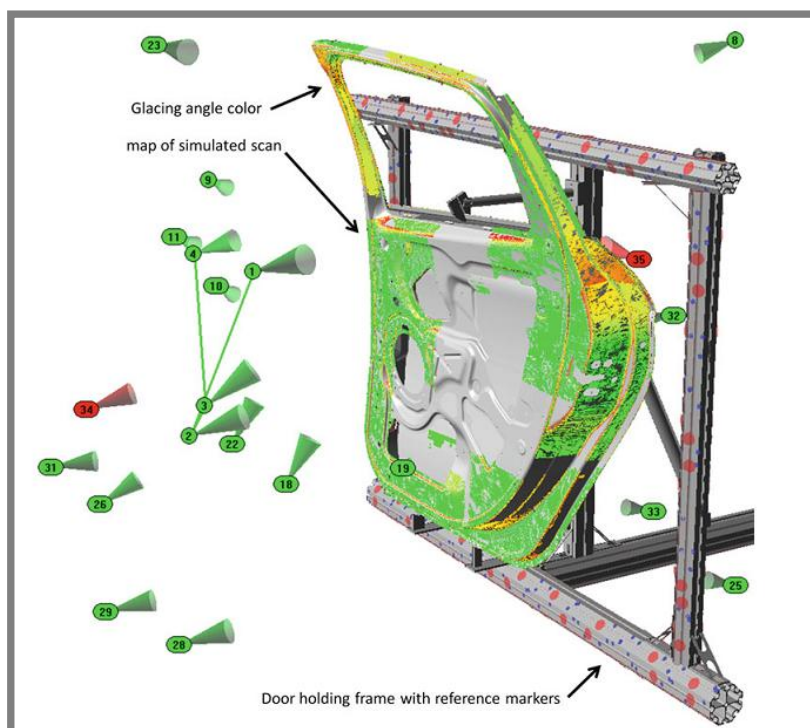
Pro generování pozic navrhuji několik strategií, které se v průběhu prací vyvíjejí. V prvních pracích je to strategie kulová (pro objekty, které mají objem přibližně stejný jako zorné pole daného skeneru) a plošná (pro velké plošné díly). Ve své poslední práci uvádějí tyto strategie:

- *standardní GD&T inspekce*
- *ostříhy a hrany*
- *velké plošné díly*
- *kompletní tvar dílu*
- *poloha konkrétních bodů*

Pro výběr pozic v případě strategie pro kompletní tvar dílu je použit koncept tzv. map viditelnosti. U velkých plošných dílů je použit koncept projekce interpolační NURBS plochy. Jednotlivé pozice jsou následně simulovány s využitím polygonální sítě daného dílu a na polygonech sítě jsou ověřovány následující podmínky:

- inkluze v zorném poli skeneru
- kontrola na pozorovací úhel z kamery/projektoru
- viditelnost z kamery/projektoru
- absence odlesků ve směru kamery.

V případě kontroly absence odlesků vyplývá z komunikace s autory práce [14], že je zde tato podmínka zmíněna, ale ve svém výzkumu se jí zatím nezabývali.

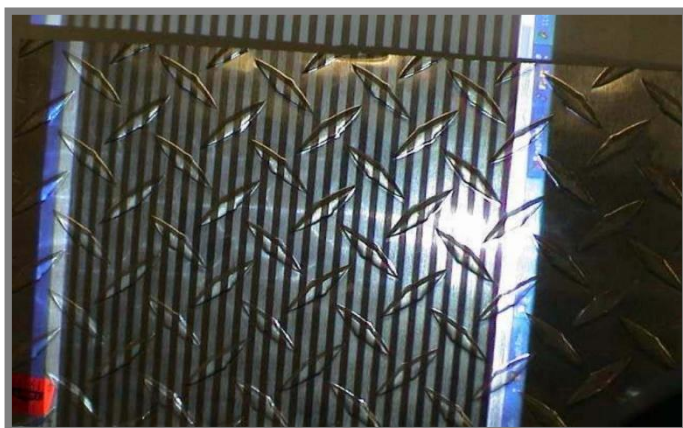


Obr. 2-4 Vypočítané měřicí pozice a simulace měření [14]

Další skupinou autorů, kteří se zabývají touto problematikou, je skupina Shi a kolektiv a jejich práce [16], [17],[18], [19], [20] a [21]. Ve svých prvních pracích [17] a [16] se zaměřují především na problém dělení modelu měřeného dílu na menší oblasti, pro které pak navrhuji způsob stanovení vhodné pozice měření. Zaměřují se na ploché díly, pro které hledají ploché množiny polygonů, které by vytvořily jeden segment, pro nějž by bylo možné nalézt vhodnou pozici. Pokud to není možné,

segment je dále rozdělen. V článku [19] je navíc při výběru pozic přidán požadavek na dostupnost robota a váha tohoto požadavku se řeší pomocí inverzní kinematiky robota. V těchto pracích je pro inspekci využívána pouze kamera.

V článku [20] své řešení autoři rozšiřují o použití vlastního navrženého skeneru s proužkovou projekcí, s použitím metody Gray Code Line Shifting. V práci [18] se autoři zaměřují především na kvalitu naměřených dat, která je někdy zanedbávána na úkor rychlosti. Proto se práce zaměřuje na způsoby doplnění chybějících dat vlivem zastínění a odlesků světla (viz Obr. 2-5). Práce řeší tento problém pomocí zpětnovazebního členu, který je zapojen přímo do probíhajícího měření a další pozice doplňuje na základě zjištění chybějících dat.



Obr. 2-5 Snímek proužkové projekce se vznikajícím odleskem [18]

2.4 Metody redukce odlesků

Problém, který stojí za vznikem přesevřených míst v obrazu a zároveň málo osvětlených částí, je nízký dynamický rozsah digitálních kamer, konkrétně použitých čipů CCD nebo CMOS. Dynamický rozsah je v porovnání s CMOS u CCD čipů obecně vyšší, stále ale v porovnání s klasickou fotografií je ve velké části případů nižší. V případě, kdy na jednotlivý pixel dopadne větší množství fotonů, než je schopný nést a převést na elektrický signál (počet elektronů), dochází u tohoto pixelu k saturaci a ztrácí se v něm informace o skutečné barvě.

2.4.1 Snímky s vysokým dynamickým rozsahem (HDR)

Jednou z možností, jak redukovat omezení nízkého dynamického rozsahu, kterým se digitální kamery vyznačují, je využití tzv. HDR snímků. Většinou se jedná o proces zachycení stejné scény při shodných podmínkách, jen s různými expozičními časy. Složením informací z těchto snímků lze docílit výsledného vyššího dynamického rozsahu [22].

Technikami využití HDR snímků v oblasti rekonstrukce tvaru objektu se zabývá řada studií. Část z nich řeší pouze problematiku různé odrazivosti povrchů (tzv. albedo), další část pak přímo problém skenování lesklých objektů.

Autoři Yau a Zhang ve své práci [23] představují metodu nazvanou jako HDRS (High Dynamic Range Scanning = skenování s vysokým jasovým rozsahem). Základem metody je pořízení řady stejných snímků s různými expozičními časy (nebo různou clonou). Na snímcích s dlouhou expozicí jsou dobře zachyceny tmavé

oblasti, na snímcích s krátkou expozicí pak světlé oblasti nebo oblasti s vysokou odrazivostí.

Podobnou metodu představuje studie autorů Skočaje a Leonardise [24], která ale využívá mechanismus výpočtu radiačních map s vysokým jasovým rozsahem. Metoda zjevně přináší zlepšení v získání dat při měření objektů s různou odrazivostí povrchu, ale ve zmíněné práci není uvedeno žádné kvantifikační měřítko pro posouzení přínosu navržené metody v porovnání s klasickými metodami.

Práce Jianga a kolektivu [25] nabízí pro řešení problému odlesků a povrchů s různou úrovní odrazivosti velmi podobný přístup jako práce [23]. Svou metodu nazývají HDRFA (High Dynamic Range Fringe Acquisition = Proužkové snímání s vysokým dynamickým rozsahem), využívají metodu promítání vzoru s fázovým posunem. Metoda by měla být odolná vůči okolnímu osvětlení. Autoři tuto schopnost demonstrují na skenování stejného dílu v noci při použití fluorescenčního světla a ve dne za běžného osvětlení. Výsledky jsou v obou případech srovnatelné. Uvedená metoda má velmi složitou proceduru a navíc podle informací uvedených v článku, byl čas potřebný pro skenování hliníkového dílu 30 s a bylo pořízeno 144 snímků, což je pro praktické využití neúnosné.

Autoři nicméně v dalším článku [26] přišli s vylepšenou technikou a použitím projektoru s frekvencí 700 Hz. Ve výsledku by tedy mělo dojít ke zkrácení projekčního času o 88 %.

2.4.2 Změna promítaného světelného vzoru

Gupta a kolektiv ve své studii [27] analyzuje a rozděluje typy efektů, ke kterým dochází při osvětlení scény a analyzuje vliv těchto efektů na získání informací o tvaru měřeného objektu. Následně navrhuje nové světelné vzory, které tyto negativní vlivy potlačují.

Na základě stanovených požadavků byly pro případ efektů dlouhého rozsahu vytvořeny vzory založené na logickém operátoru XOR¹, které mají šířku všech pruhů stejnou jako základní binární vzor. V případě použití základního binárního kódu s šířkou 4 pixely, budou mít všechny vzory největší šířku právě 4 pixely (XOR-04). Pro případ efektů krátkého rozsahu byl použit již dříve používaný vzor zachovávající velkou minimální šířku pruhů (max. min-SW). Protože jsou tyto přístupy každý vhodný na jiný druh chyb, výsledná sada vzorů se skládá z XOR-02, XOR-04, max. min-SW vzorů a klasického šedého kódování.

Uvedená metoda je velmi dobře a podrobně popsána a především přináší výsledky, které opravdu do určité míry redukuje negativní efekty spojené s lesklými materiály nebo materiály, jimiž částečně prostupuje světlo.

2.5 Osvětlovací modely

Některé práce zabývající se problematikou plánování snímání se pokoušejí do přípravy pozic měření zahrnout osvětlovací modely, které by simulovaly skutečné podmínky při osvětlení měřeného objektu vnějším zdrojem světla. Osvětlovací modely, které se vyskytují v úlohách počítačového vidění, je možné dělit na ty, uvažující pouze difuzní odraz světla a ty, které uvažují i lesklý odraz [28]. Známými používanými modely jsou například: *Lambertův*, *Phongův*, *Beckmann-Spizzichino*, *Torrance-Sparrow* nebo *Cook-Torrance*. Obecně je možné daný povrch modelovat

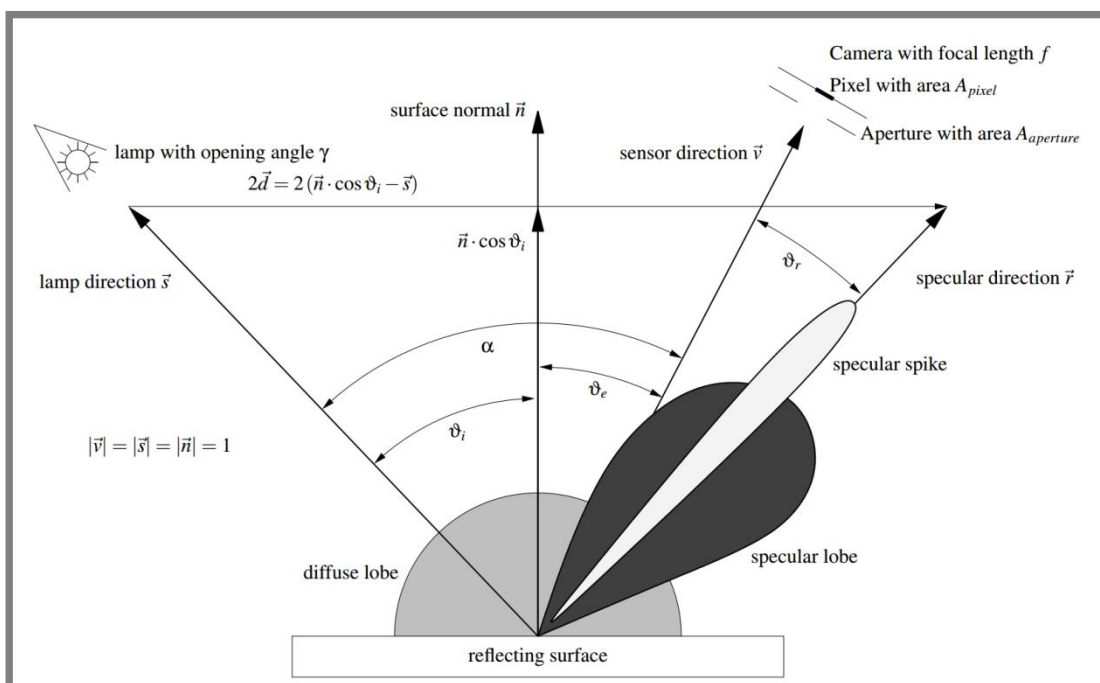
¹ XOR je logický operátor exkluzivní disjunkce. Nabývá hodnoty *pravda* právě když každá vstupní hodnota nabývá, v porovnání s ostatními vstupy, unikátní hodnoty. [35]

pomocí funkce BRDF (Bidirectional Reflectance Distribution Function = obousměrná distribuční funkce odrazu světla).

V článku [29] navrhuji autoři BRDF funkci, díky které je možné s využitím naměřených hodnot odrazivosti pro vybrané materiály určit vhodné pozice osvětlení pro dosažení požadovaných hodnot výsledné průměrné hodnoty šedi u výsledného obrazu. Při známém osvětlení je možné zpětně odvodit potřebné parametry kamery (clona, expoziční čas, zaostření) pro optimální provedení daného inspekčního úkonu. Autoři využívají Nayarův [28] osvětlovací model, který je složený ze tří složek odrazu – difuzního, lesklého laloku a lesklého hrotu. Rovnici může být tento model zapsán následovně:

$$R = \rho(\cos \vartheta_i + \sigma_1 \cos^{m_1} \vartheta_r + \sigma_2 \cos^{m_2} \vartheta_r) \quad (1)$$

kde ρ je koeficient difuzního odrazu (albedo), σ_1, σ_2, m_1 a m_2 jsou koeficienty lesklého odrazu a úhly ϑ_i a ϑ_r vycházejí z Obr. 2-6.



Obr. 2-6 Model odrazivosti tvořený třemi složkami - difuzní, lesklým lalokem a hrotem [29]

2.6 Analýza a zhodnocení poznatků získaných na základě rešerše

Z uvedené rešerše, která je v plné podobě dostupná v dizertační práci, vyplývá, že vznikají kompletní inspekční systémy, které řeší celý proces od importu CAD modelu měřeného dílu spolu s informacemi o tolerancích, přes generování potřebných pozic měření a samotné automatické měření až po vyhodnocení tohoto měření vzhledem k předepsaným tolerancím. Tyto systémy bývají zaměřeny na specifický typ měřených objektů (např. díly se standardními tvarovými prvky, jako jsou roviny, válce, drážky, apod.) nebo na měření diskretních inspekčních bodů, které vycházejí z montážních, zástavbových či jiných požadavků.

Část uvedených prací se zabývá skenováním lesklých dílů, kam spadají právě i plechové díly. Značná část publikací se zabývá metodami redukce vlivů odlesků, které mají velký negativní dopad na naměřená data. Tyto práce řeší danou

problematiku zatím především v laboratorních podmínkách bez aplikace do inspekčního systému. Zpřesnění modelu, který simuluje skutečné vizuální vlastnosti měřeného dílu, řeší některé z dalších uvedených prací. Ke zpřesnění jsou často využívány osvětlovací modely, od Phongova přes Beckmann-Spizzichino a Torrance-Sparrow až po složitější BRDF funkce. Výpočetně ne příliš náročný a fyzikálně věrný model popsáný Nayarem byl úspěšně použit v jedné z prací pro odlišný druh inspekce a bude ve zjednodušené podobě využit i dále v této práci.

První ze dvou dalších omezení, která vyvstala z rešerše, je jen minimální řešení inspekčních systémů pro dvoukamerové skenery, častější je aplikace na skenery jednokamerové. Druhým omezením je aplikace buď na díly se standardními tvarovými prvky, nebo na plechové díly s nižší tvarovou složitostí.

Lze proto uvést, že zatím chybí systém pro automatický návrh pozic měření tvarově složitějších plechových dílů, který by počítal s dvoukamerovým skenerem s proužkovou projekcí a aplikoval fyzikálně věrný osvětlovací model pro návrh pozic měření a tyto pozice následně i simuloval na dostupnost průmyslového robota. Zároveň není v člancích uvedeno, k jaké shodě mezi simulací měření a skutečným měřením došlo. Hlavním hlediskem je správnost nastavení osvětlovacího modelu.

3 VYMEZENÍ CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE A NÁVRH ZPŮSOBU JEJÍHO ŘEŠENÍ

Dizertační práce se věnuje návrhu metodiky a vytvoření softwaru pro automatické generování pozic roboticky polohované skenovací hlavy. Ta funguje na principu proužkové projekce a využívá dvoukamerový systém. Metodika je zaměřena na digitalizaci plechových dílů a do generování pozic měření aplikuje pokročilý osvětlovací model. Vstupem navrženého softwaru je CAD model měřeného dílu převedený do podoby polygonální sítě a výstupem kód pro řízení robota, který je použit pro automatické skenování daného dílu. Výstupem jsou zároveň expoziční časy použité pro skenování v jednotlivých měřicích pozicích.

Globální cíl práce:

Globálním cílem práce je návrh a ověření metodiky automatizace procesu 3D digitalizace plechových dílů ve fázi generování měřicích pozic skeneru s využitím průmyslového robota.

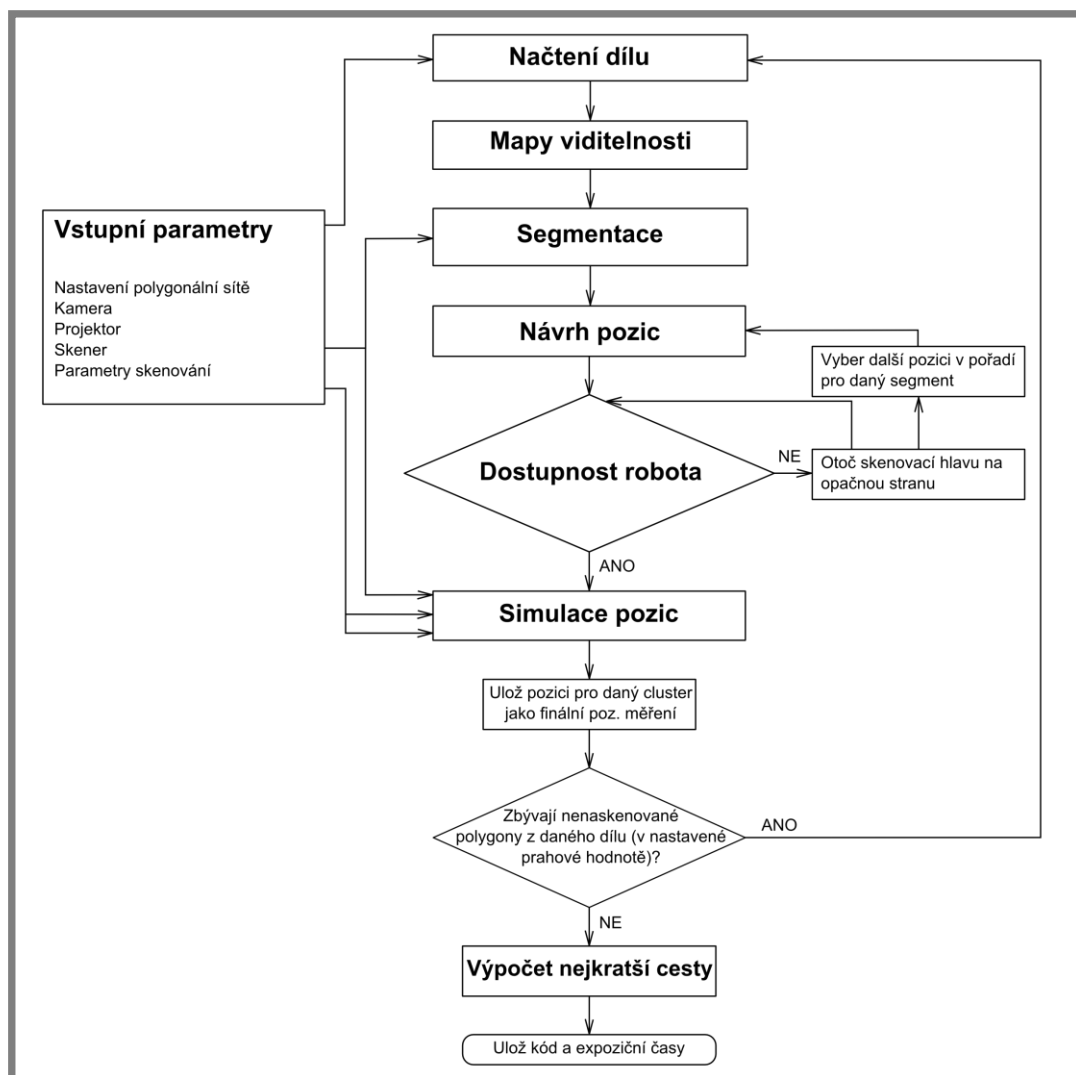
Dílčí cíle práce:

1. Návrh metodiky generování pozic skeneru na základě CAD dat výrobku
2. Návrh softwarového řešení metodiky včetně implementace osvětlovacího modelu
3. Simulace dostupnosti skenovacích pozic průmyslového robota
4. Experimentální ověření navržené metodiky

K dosažení stanoveného cíle práce budou realizovány předběžné experimenty pro objasnění parametrů skenování plechových dílů. Následně budou provedeny experimenty sloužící k určení limitujících parametrů pro skenování plechových dílů a parametrů osvětlovacího modelu, které budou použity jako jeden ze vstupů pro navrhovaný software. Hlavní část práce bude věnována implementaci navržené metodiky do samotného softwaru. Ten bude realizován jako modul pro 3D modelovací software Rhinoceros. Na závěr budou navržená metodika a vytvořený software ověřeny pomocí experimentů s testovacími plechovými díly a za použití dvoukamerového skeneru s proužkovou projekcí ATOS Triple Scan a průmyslového robota KUKA KR60 HA.

4 MATERIÁL A METODY

Kapitola popisuje návrh metodiky řešení daného problému. Navržená metodika vychází z cílů práce a zároveň z přístupů užívaných v systémech rozebraných v rešeršní části dizertační práce. Metodika řešení je znázorněna graficky na Obr. 4-1. Jednotlivé podkapitoly rozebírají části metodiky a návrh softwaru dle této metodiky a také postup zvolený pro její experimentální ověření.



Obr. 4-1 Diagram navržené metodiky a vytvořeného softwaru

4.1 Návrh metodiky a její implementace v navrženém softwaru

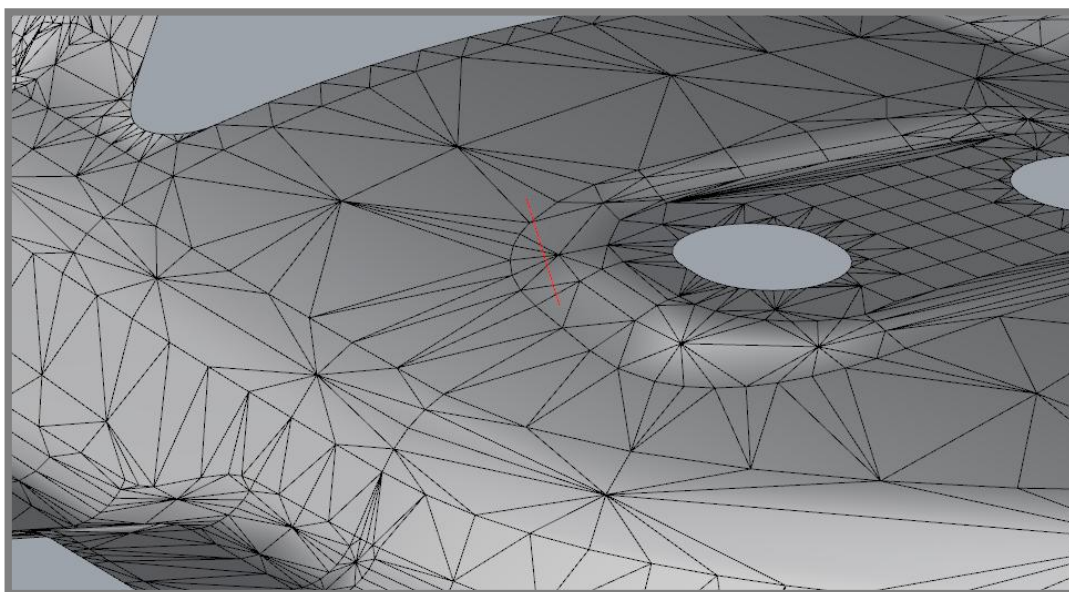
4.2.1 Reprezentace měřeného dílu

Pro práci s modelem se nabízejí dvě možné reprezentace:

1. Plošný model tvořený NURBS plochami
2. Polygonální síť tvořená troj a čtyřúhelníky

U plošného modelu je výhodou zachování přesného tvaru dílu. Reprezentace plochy pomocí bodů a normál je řešena využitím tzv. Greville bodů. Jejich hustota je závislá na změnách křivosti plochy. U rovinných ploch je tato hustota nedostatečná a muselo by se řešit dodatečné zhuštění bodů.

U druhé možnosti, reprezentace pomocí polygonální sítě, je nevýhodou to, že detail modelu velmi závisí na hustotě generované sítě. Především v místech s vysokým stupněm křivosti může být reprezentace pomocí trojúhelníků nepřesná. Důsledkem tedy je, že síť je velmi hustá a další práce s ní je náročná nebo v případě řídké sítě se ztrácí popis. Výhodou polygonů je na druhou stranu to, že jejich rozložení je hustší a rovnoměrnější než u Greville bodů. Snadno je možné získat body tvořící tyto polygony nebo také středy polygonů a jejich normály (viz Obr. 4-2). Další výhodou je možnost určení plochy polygonů, což je uplatněno dále v části 4.2.3. Další výhodou polygonální reprezentace je jednoduchost výpočtu průsečíku paprsku s polygonem. Z uvedených důvodů byla zvolena reprezentace modelu pomocí polygonální sítě.



Obr. 4-2 Model reprezentovaný polygonální sítí s vyznačenou normálou u jednoho polygonu

4.2.2 Segmentace měřeného dílu

Pro účely určení vhodných pozic měření je nutné celý díl rozdělit na oblasti, které bude teoreticky možné zachytit na jeden záběr skeneru. V uvedené práci se počítá se skenováním plechových dílů s komplexnějším tvarem. Zároveň to znamená, že se jedná o díly, které mají převážně plošný charakter (rozměry dílu jsou výrazně větší v jednom nebo dvou rozměrech vůči třetímu rozměru a díl je reprezentovaný plochou, nikoliv objemem) a díl se měří pouze z jedné strany. Pro segmentaci dílu byla vytvořena metoda popsaná následujícím algoritmem:

1. Ulož středy všech polygonů a jejich normály
2. Vytvoř nejmenší obálkový kvádr (bounding box) měřeného dílu
3. Rozděl kvádr na krychle o velikosti nejmenšího rozměru měřicího objemu použité optiky skeneru
4. Vypočítej průměrnou váženou normálu polygonů v každé krychli. Váhou je plocha jednotlivých polygonů
5. Ulož do 1. segmentu všechny body, jejichž normály jsou do 45° elevace (θ) od průměrné vážené normály
6. Do segmentů 2-5 ulož všechny body, jejichž normály mají úhel elevace (θ) od 45° do 135° a azimut (φ) postupně od 0° do 90° , 90° až 180° , atd.

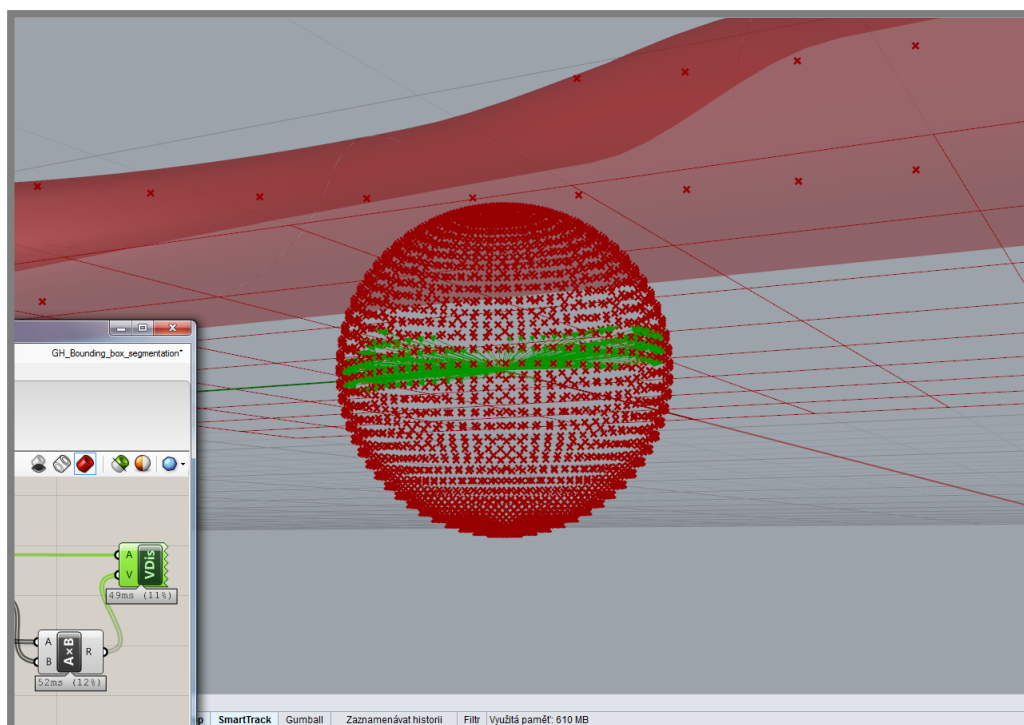
7. Do segmentu 6 ulož body s normálami v úhlu elevace od 135° do 180°
8. Dále nepočítej se segmenty s počtem bodů menším než přednastavená limitní hodnota (degenerované trojúhelníky, špatně orientovaná normála, apod.)

4.2.3 Návrh pozic měření

Vstupem do této části softwaru jsou body dílu (střed polygonů) a jejich normály rozdělené do krychlí podle zvoleného měřicího objemu a dále v těchto krychlích rozdělené do segmentů podle normál polygonů.

K výpočtu pozic měření je využit koncept map viditelnosti a kombinovaných map viditelnosti (tzv. Combined Visibility Map). Cílem tohoto kroku je nalézt takové orientace kamer a projektoru vzhledem k danému segmentu, že bude co nejvíce jeho bodů viditelných. Metoda map viditelnosti staví na principu, který je možné popsat následujícím algoritmem:

1. Pro každý bod segmentu (střed polygonu) udělej:
 - 1.1. Vytvoř body na kouli o jednotkovém průměru tak, že střed koule je v daném bodě segmentu a body jednotkové koule budou rozmístěny pravidelně v rozmezí $\theta = \langle 0; \pi \rangle$; $\varphi = \langle 0; 2\pi \rangle$. Krok pro oba úhly zvol 5° .
 - 1.2. Vytvoř vektor z bodu (střed polygonu) postupně skrze všechny body na kouli (viz Obr. 4-3)
 - 1.3. Pokud je vektorový součin vektoru a normály větší než 0,26, ulož hodnotu 0
 - 1.4. Vyšli paprsek ve směru vektoru
 - 1.5. Pokud paprsek protne nějaký polygon na modelu, ulož hodnotu 0
 - 1.6. Pokud paprsek nic neprotne, ulož hodnotu 1
 - 1.7. Ulož hodnoty do dvourozměrného pole



Obr. 4-3 Paprsky vyslané přes body na jednotkové kouli (viditelné jsou pouze paprsky protínající síť)

Mapa viditelnosti je vypočítána pro všechny polygony dílu na začátku výpočtu. Následně je uložena pro použití v iteračním postupu. V něm následuje využití metody kombinované mapy viditelnosti, která je počítána pro body jednotlivých segmentů a jejíž výpočet probíhá podle následujícího algoritmu:

1. Sečti dvourozměrná pole map viditelnosti pro všechny body segmentu. Tím vznikne dvourozměrné pole kombinované mapy viditelnosti
2. Interpoluj výsledné pole na rozměr $0-180^\circ$ ($0-\pi$) a $0-360^\circ$ ($0-2\pi$) za použití bilineární interpolace
3. Proveď dilataci² výsledného pole o hodnotu x
4. Ulož výsledné pole

4.2.4 Výpočet možných pozic měření

Na základě kombinované mapy viditelnosti pro každý segment a průměrné vážené normály daného segmentu jsou vypočítány možné pozice skenování. Pro výpočet je použita alternativa k Vincenty algoritmu pro geodetický výpočet vzdálenosti dvou bodů ve sférických souřadnicích. Tento algoritmus je používán pro přesné výpočty uvažující Zemi jako elipsoid. Ve zjednodušené podobě se uvažuje tvar koule. Vychází se z výpočtu ortodromy (nejkratší spojnice dvou bodů na kulové ploše [30]). Výpočet neznámého bodu se řeší následovně [31]:

$$\theta_2 = \arcsin(\sin \theta_1 \cos \delta + \cos \theta_1 \sin \delta \cos \lambda) \quad (2)$$

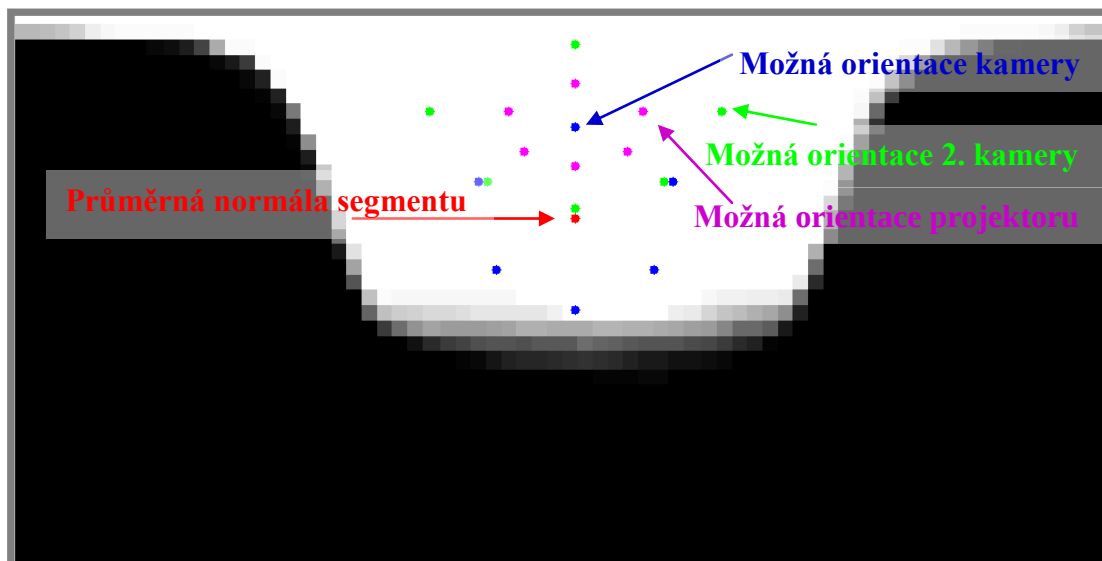
$$\varphi_2 = \varphi_1 + \text{atan2}(\sin \lambda \sin \delta \cos \theta_1, \cos \delta - \sin \theta_1 \sin \theta_2) \quad (3)$$

kde δ je úhel mezi dvěma body na kulové ploše, λ je počáteční směrnik, θ_1 a θ_2 jsou úhly elevace a φ_1 a φ_2 jsou úhly azimutu těchto dvou bodů (resp. jejich vektorů ze středu koule). Těmito dvěma body (vektory) jsou průměrná normála segmentu a možná orientace kamery (projektoru).

Při využití známého směru průměrné normály segmentu, dosazením šesti počátečních směrniků v rozmezí ($0 - 360^\circ$) po 60° a úhlu δ v hodnotě 40° (ve výpočtu zvoleno jako vhodný úhel mezi normálou povrchu a kamerou) získáme šest možných směrů první kamery ($C1_{\theta_i}$ a $C1_{\varphi_i}$). Obdobným způsobem pak pro každý směr kamery a úhel δ v hodnotě odpovídající úhlu mezi první a druhou kamerou skeneru získáme šest možných směrů druhé kamery $C2_{\theta_i}$ a $C2_{\varphi_i}$. Směr projektoru (P_{θ_i} a P_{φ_i}) je již závislý.

Výsledek v grafické podobě je na Obr. 4-4. Zobrazena je průměrná normála daného segmentu, šest možných směrů první kamery a pro jeden z těchto směrů možné směry druhé kamery a závislé směry projektoru.

² dilatace je morfologická operace používaná pro úpravu obrazových dat. Dilatace provádí rozšíření oblastí obsažených v těchto datech.



Obr. 4-4 Kombinovaná mapa viditelnosti s možnými orientacemi kamer a projektoru

Navržené pozice jsou následně posouzeny na základě pěti koeficientů: viditelnosti, shodné elevace kamery a projektoru, orientace objektu, orientace segmentu, orientace druhé kamery. Výsledný koeficient je vypočítán dle rovnice:

$$Cf_{pos} = a \cdot Cf_{vis} + b \cdot Cf_{\theta} + c \cdot Cf_{obj_or} + d \cdot Cf_{seg_or} + e \cdot C_{2cam} \quad (4)$$

kde a , b , c , d , e jsou váhové koeficienty ovlivňující vliv jednotlivých koeficientů. Váhové koeficienty jsou na základě zkušeností práce se skenerem a na základě testování nastaveny na hodnoty: $a = 5$, $b = 1$, $c = 1,5$, $d = 2$, $e = 3$.

Vypočítané možné pozice jsou na základě koeficientu Cf_{pos} seřazeny od nejvyšších hodnot. V následujícím iteračním postupu jsou pak tyto pozice v tomto pořadí ověřovány na dostupnost robotem a absenci kolizí s měřeným dílem nebo jinou součástí měřené scény.

V této fázi výpočtu se stále ještě nejedná o konkrétní pozice v prostoru, ale orientace (úhly elevace a azimutu) obou kamer a projektoru. Konkrétní pozice jsou vypočítány až v dalším kroku v závislosti na polygonech segmentu, pro který se počítají.

4.2.5 Kontrola dostupnosti robota

Dalším krokem ve výpočtu je kontrola dostupnosti vypočítaných pozic pro robota. Pro tento krok je využit modul pro Grasshopper, KUKA|prc. Především je určen pro generování drah obrábění, poskytuje však i možnost tvorby vlastních obecných obráběcích nástrojů. Toho je využito k tvorbě nástroje v podobě skenovací hlavy. Ke kontrole dostupnosti robota byly řešeny tyto dílčí kroky:

- 1) **Model místnosti s robotem** – díky modelu místnosti s robotem mohou být kontrolovány kolize s objekty v místnosti.
- 2) **Báze robota** – jedná se o bod, od kterého robot odečítá souřadnice uvedené v kódu pro své řízení. Jedná se o tři hodnoty posunutí a tři hodnoty natočení vzhledem k počátku robota. V konkrétním případě jde o bod umístěný na obráběcím stole, kde je umístěn i měřený díl.

-
- 3) **Vlastní nástroj** – pomocí komponenty Custom tool v prostředí Grasshopperu byly stanoveny hodnoty pro vlastní nástroj – skener ATOS připevněný pomocí držáku vlastní výroby. Nástroj je definován pomocí tří souřadnicových hodnot posuvu vůči přírubě robota a tří hodnot natočení ve směru těchto os.
 - 4) **Nastavení os robota** – každý robot je definován pomocí Denavit-Hartenbergových (DH) parametrů. Ty stanoví vztah mezi jednotlivými články kinematického řetězce. U robota jsou tedy díky nim popsány vzdálenosti a úhly mezi jednotlivými osami. Toto je pro konkrétního robota (KUKA KR60HA) v modulu KUKA|prc přednastaveno, ručně jsou doplněny konkrétní rozsahy os.

Samotná dostupnost robota a kontrola kolizí je prováděna podle následujícího postupu:

1. Nastav skener do pozice podle orientace s nejvyšším koeficientem Cf_{pos} a tento koeficient následně nastav na hodnotu 0
2. Je hodnota kolize větší než 0? ³
 - a. Nastav skener do takové pozice, že místo v pozici levé kamery je pravá a naopak (skener je orientován „vzhůru nohama“, jinak se však jedná o stejnou pozici)
 - b. Je hodnota kolize větší než 0?
 - i. Nastav skener do pozice podle orientace s nejvyšším koeficientem Cf_{pos} , ten nastav na hodnotu 0 a pokračuj od bodu 2
 - c. Jinak
 - i. Ulož tuto pozici a informaci o přetočení skeneru
3. Jinak
 - a. Ulož tuto pozici a informaci o přetočení skeneru

4.2.6 Simulace pozic měření

Po ověření, že je pozice dostupná a nedochází v ní ke kolizi, je následně simulována pro stanovení viditelnosti konkrétních polygonů. Proces simulace se skládá ze čtyř základních kroků:

1. *Inkluze polygonů*
2. *Okluze polygonů*
3. *Omezení pozorovacích úhlů*
4. *Viditelnost polygonů*

Podmínky 1 až 3 se ověřují zvlášť pro obě kamery i projektor. Podmínka 4 se ověřuje vždy pro dvojici kamera-projektor. Dvougamerový skener totiž funguje jako dva jednokamerové skenery (ve zjednodušeném pojetí), a proto se výsledná viditelnost po simulaci skládá součtem polygonů viditelných jednou a druhou kamerou.

Podmínky se ověřují pro všechny polygony dílu. To je na jednu stranu poměrně časově náročné, je díky tomu ale možné následně ověřit shodu simulace s reálným měřením. Do každého dalšího kroku výpočtu vstupují jen polygony viditelné v tom předchozím. A hned v prvním kroku se počet ověřovaných polygonů výrazně sníží a tento výpočet je v porovnání s následujícími kroky velmi rychlý a efektivní.

³ Pokud dochází ke kolizi s měřeným dílem nebo jiným objektem ve scéně, je kolize rovna 1. Pokud je některé osa mimo svůj rozsah, je kolize rovna počtu os mimo rozsah.

Z hlediska přínosu práce je nejzajímavější část simulace zaměřená na viditelnost polygonů, proto je dále zmíněna (ostatní výpočty viz dizertační práce).

Viditelnost polygonů (z osvětlovacího modelu)

Posledním krokem simulace je ověření viditelnosti polygonů využitím osvětlovacího modelu dle Nayara [28]. Jeho aplikace na vizuální inspekční úlohu je popsána v článku [29] a z tohoto článku také vychází aplikace pro mé řešení.

Nayarův model se skládá ze tří složek odlesků: difuzního, lesklého laloku a lesklého hrotu a může být popsán pomocí následující rovnice:

$$R = \rho(\cos \vartheta_i + \sigma_1 \cos^{m_1} \vartheta_r + \sigma_2 \cos^{m_2} \vartheta_r) \quad (5)$$

Tento model byl zvolen, protože dobrým způsobem modeluje nelambertovské povrchy, které však zároveň nemají čistě lesklý odraz s výraznou špicí. Tomu materiál plechových dílů plně odpovídá.

Osvětlovací model je implementován takovým způsobem, že nejprve počítá ideální expoziční čas pro polygony daného segmentu a následně počítá viditelnost jednotlivých polygonů podle jejich výsledné hodnoty šedé, kterou by měly v pořizovaném obraze. Pokud je tato hodnota příliš nízká, polygon má nízký jas a promítaný vzor na něm nemůže být dekodován. Pokud je naopak tato hodnota příliš vysoká, polygon má pro dekodování příliš vysoký jas (je přesvětlený vlivem odrazu světla).

Výpočet viditelnosti polygonů probíhá podle následujícího postupu:

1. Vypočítej expoziční čas pro každý ze zbývajících nenaskenovaných polygonů segmentu (z ideální hodnoty šedé) podle rovnice:

$$t_{pol} = \frac{(G_{ideal} \cdot d_{pol}^2)}{k_1(\cos \vartheta_i + \sigma_1 \cos^{m_1} \vartheta_r + \sigma_2 \cos^{m_2} \vartheta_r)} \quad (6)$$

2. Vypočítej průměrný expoziční čas pro tyto polygony: t_{avg}
3. Vypočítej hodnotu šedé pro všechny polygony vstupující do výpočtu z předchozího kroku simulace (omezení pozorovacích úhlů) dle rovnice:

$$G_{pol} = \frac{k_1 \cdot t_{avg} \cdot (\cos \vartheta_i + \sigma_1 \cos^{m_1} \vartheta_r + \sigma_2 \cos^{m_2} \vartheta_r)}{d_{pol}^2} \quad (7)$$

4. Polygon je viditelný, jestliže jeho výsledná hodnota šedé je v rozmezí minimální a maximální hodnoty, která umožňuje dekodování vzoru, tedy:

$$G_{min} < G_{pol} < G_{max} \quad (8)$$

Výstupem tohoto kroku a tedy i celé simulace je seznam polygonů, které jsou v dané pozici viditelné. Zároveň je výstupem expoziční čas, který se použije pro skenování v dané pozici.

4.2.7 Hledání nejkratší cesty robota

Hledání nejkratší cesty (propojení známých pozic, mezi nimiž jsou známé vzdálenosti) je velmi známý problém a řeší se jako „Problém obchodního cestujícího“. V oblasti automatického skenování řeší tuto problematiku například článek [32]. V této práci je použit aproximační řešič, který nachází suboptimální řešení a využívá hladový algoritmus (s polynomiální složitostí) s následnou optimalizací [33]:

1. Na začátku náleží každý vrchol své vlastní cestě. Každá cesta má délku 1.
2. Hledej dvě nejbližší rozpojené cesty a spoj je.
3. Opakuj, dokud nezůstanou minimálně dvě cesty.
4. Pokus se body přeuspořádat tak, aby se řešení zlepšilo

Tento řešič byl pro potřeby práce upraven tak, aby zohledňoval nejen vzdálenosti mezi jednotlivými pozicemi, ale také prostorovou orientaci skeneru a tím také konfiguraci robota. K tomu se využívá informace o natočení obrazové roviny levé kamery. Díky tomuto rozšíření je zohledněno, jak moc se bude robot otáčet mezi jednotlivými pozicemi. Cílem je dosáhnout co nejmenšího přetáčení skenovací hlavy na robotovi a tím i velkých změn v konfiguraci robota.

Samotný výpočet výsledných vzdáleností mezi jednotlivými pozicemi je sestaven ze tří dílčích parametrů:

1. Skutečná euklidovská vzdálenost mezi body (pozice levé kamery) v prostoru
2. Úhel mezi normálami rovin (osa z), definujících orientaci levé kamery
3. Úhel mezi osami x těchto rovin

4.2 Experimentální ověření navržené metodiky

Kapitola popisuje experimenty, které byly realizovány pro zhodnocení navržené metodiky realizované představeným softwarem. Metodika byla ověřena experimenty provedenými na dvou testovacích plechových dílech uvedených dále (viz Obr. 4-5 a Obr. 4-6).

4.3.1 Použité plechové díly

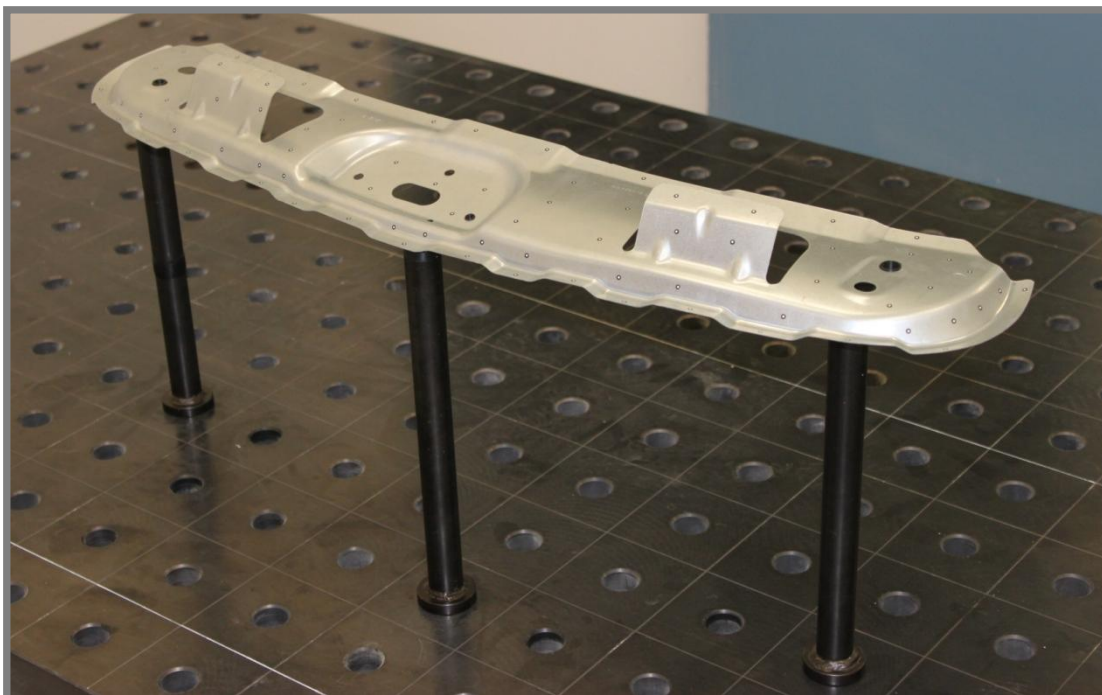
K realizaci experimentů byla provedena měření s následujícím nastavením polygonálních sítí modelů plechových dílů:

Tabulka 1 Modely použitých plechových dílů

Měřený díl a původ dat	Počet polygonů	Identifikace modelu
Plech1		
CAD model	9477	P1_CAD_10000
CAD model	29910	P1_CAD_30000
Skenovaný díl	10022	P1_SKEN_10000
Skenovaný díl	29884	P1_SKEN_30000
Plech2		
Skenovaný díl ⁴	8800	P2_SKEN_10000
Skenovaný díl	29169	P2_SKEN_30000

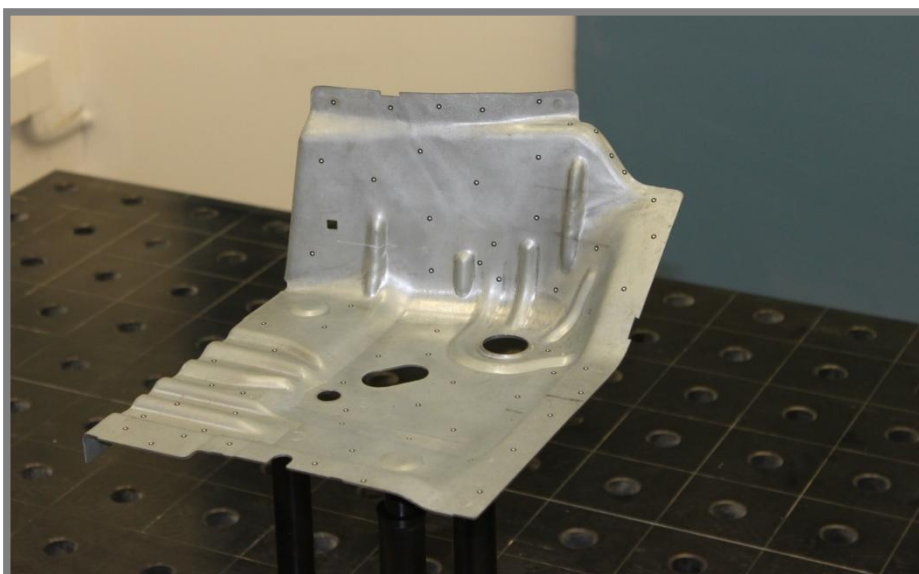
⁴ K dílu Plech2 byl k dispozici CAD model, který však neobsahoval některé prolisy a byl tak pro generování pozic nepoužitelný.

Plech1



Obr. 4-5 Umístění plechového dílu (Plech1) na stole pro obrábění

Plech2



Obr. 4-6 Umístění plechového dílu (Plech2) na stole pro obrábění

4.3.2 Porovnání s ruční přípravou pozic

Cílem tohoto kroku bylo ověřit navržené řešení v porovnání s ruční přípravou pozic skenování na robotickém pracovišti. Pro porovnání navržené metodiky byly hodnoceny následující parametry:

- čas potřebný ke generování pozic (v porovnání s časem ruční přípravy)

-
- počet vygenerovaných pozic měření (v porovnání s počtem pozic připravených ručním způsobem)
 - kompletnost naskenovaných dat po měření dle vygenerovaných pozic
 - vliv hustoty sítě na počet vygenerovaných pozic a čas výpočtu

4.3.3 Shoda simulovaných a reálných pozic měření

Cílem tohoto hodnocení bylo porovnat shodu simulovaných a reálných skenovacích pozic. Shoda simulovaných a reálných pozic byla vyhodnocena na základě simulovaných a reálných snímků kamer.

Po sesazení dvojic takto získaných snímků bylo provedeno vyhodnocení následujících parametrů:

- poměr velikostí snímků
- posun středů snímků ve směrech x a y

4.3.4 Míra shody naskenované plochy

V tomto hodnocení bylo cílem porovnat úroveň naskenované plochy v jednotlivých simulovaných a reálných záběrech skeneru. Z tohoto porovnání bude následně zřejmé, do jaké míry simulace odpovídá reálnému stavu. Byl hodnocen vliv následujících parametrů:

- přesnost modelu (sít' z CAD modelu vs. sít' získaná z fyzického dílu)
- hustota polygonální sítě
- parametry osvětlovacího modelu

4.3.5 Zaznamenání polygonů segmentů

Důležitým krokem v navržené metodice je rozdělení měřeného dílu na jednotlivé segmenty, pro které se následně počítají pozice měření. V navržené metodice je použita metoda dělení na krychle podle velikosti měřicího objemu a následně na segmenty dle normál polygonů v těchto krychlích. Cílem následného hodnocení bylo ověření, jaká část segmentu, pro nějž byla pozice generována, byla skutečně naskenována, a jak je tedy tato metoda segmentace efektivní.

5 ANALÝZA A INTERPRETACE ZÍSKANÝCH ÚDAJŮ

Obsahem této kapitoly je hodnocení navržené metodiky na základě experimentálních měření a jejich statistického zpracování. Měření byla provedena na dvou plechových dílech s využitím 3D skeneru ATOS Triple Scan a průmyslového robota KUKA KR60HA. Na základě zpracovaného hodnocení jsou vyvozeny obecné závěry k navržené metodice. Data získaná z experimentálních měření byla vyhodnocena s využitím softwaru Statistica 10.

5.1 Srovnání ruční přípravy pozic robota a automatizovaného přístupu

Ruční příprava pozic

Tabulka 2 uvádí čas potřebný k ruční přípravě pozic robota pro následné měření dílu Plech1.

Tabulka 2 Parametry ruční přípravy pozic pro měření dílu Plech1

Parametry modelu	Čas přípravy pozic	Počet pozic měření	Počet smazaných (opravených) pozic
<i>Plech1</i>	1:12 h	31	11
<i>Plech1</i>	1:13 h	30	10

Automatické generování pozic

Tabulka 3 shrnuje výsledky automatické přípravy pozic měření. Ta je připravena pro dva testovací díly a jejich modely s různým nastavením polygonální sítě.

Tabulka 3 Výsledné parametry automatického generování pozic

Parametry modelu	Celkový čas generování pozic [mm:ss]	Čas výpočtu VM [mm:ss]	Počet vygenerovaných pozic
<i>Plech1</i>			
<i>P1_CAD_10000</i>	11:20	8:05	34
<i>P1_CAD_30000</i>	36:30	30:55	37
<i>P1_SKEN_10000</i>	10:40	8:25	33
<i>P1_SKEN_30000</i>	35:20	25:35	40
<i>Plech2</i>			
<i>P2_SKEN_10000</i>	10:55	8:35	38
<i>P2_SKEN_30000</i>	35:10	28:30	46 (1 nedostupná)

5.1.1 Porovnání času přípravy měřicích pozic

Porovnáním časů z tabulek (Tabulka 2 a Tabulka 3) dojdeme k závěru, že díky automatické přípravě pozic dojde k úspoře času o (50 – 85) % v porovnání s jejich ruční přípravou, což lze považovat za velký přínos. Výše úspory času závisí z největší míry na hustotě použité polygonální sítě.

5.1.2 Porovnání počtu vygenerovaných pozic

V automatickém generování došlo k nárůstu počtu pozic o (6,5 – 33) %. Nejedná se o nijak extrémní nárůst, v ideálním případě jde o nárůst o dvě měřicí pozice. V případě použití u sériového měření bude však dále cílem dosáhnout srovnatelného nebo nižšího počtu pozic.

5.1.3 Zhodnocení kompletnosti naskenovaných dat

Kompletnost naskenovaných dat vypovídá o schopnosti navržené metodiky a vytvořeného softwaru vypočítat takové pozice, ze kterých dojde při následném měření k naskenování celého dílu. Kompletnost naskenovaných dat byla posuzována na základě porovnání celkového obsahu plochy polygonální sítě modelu použitého ke generování a obsahu plochy sítě získané při skenování. Z výsledků vyplývá, že u všech měření jsou rozdíly do 1 %. Zajímavé je, že i u dílu Plech2 došlo k naskenování plochy s rozdílem do 1 % vůči ploše modelu. Důvodem je použití osvětlovacího modelu pro lesklejší materiál na díl z mírně matnějšího materiálu. V některých místech tedy dojde k naskenování většího množství dat v porovnání se simulací. Neplatí to ovšem obecně, materiál se jeví jako světlejší a tak při vypočítaných expozičních časech dojde snadno k saturaci.

5.1.4 Vliv hustoty polygonální sítě

Tabulka 3 dokazuje, že hustota polygonální sítě negativním způsobem ovlivňuje počet vygenerovaných pozic měření. U provedených experimentálních měření se rozdíl počtu pozic u stejného modelu s různým nastavením hustoty polygonální sítě liší v rozsahu 9–21 %. V případě P1_SKEN a P2_SKEN je to způsobeno generováním pozic pro více segmentů. Do nich totiž spadají například malé polygony (se svými normálami) na okrajích dílu, které nejsou orientované v hladké návaznosti na okolní plochu dílu.

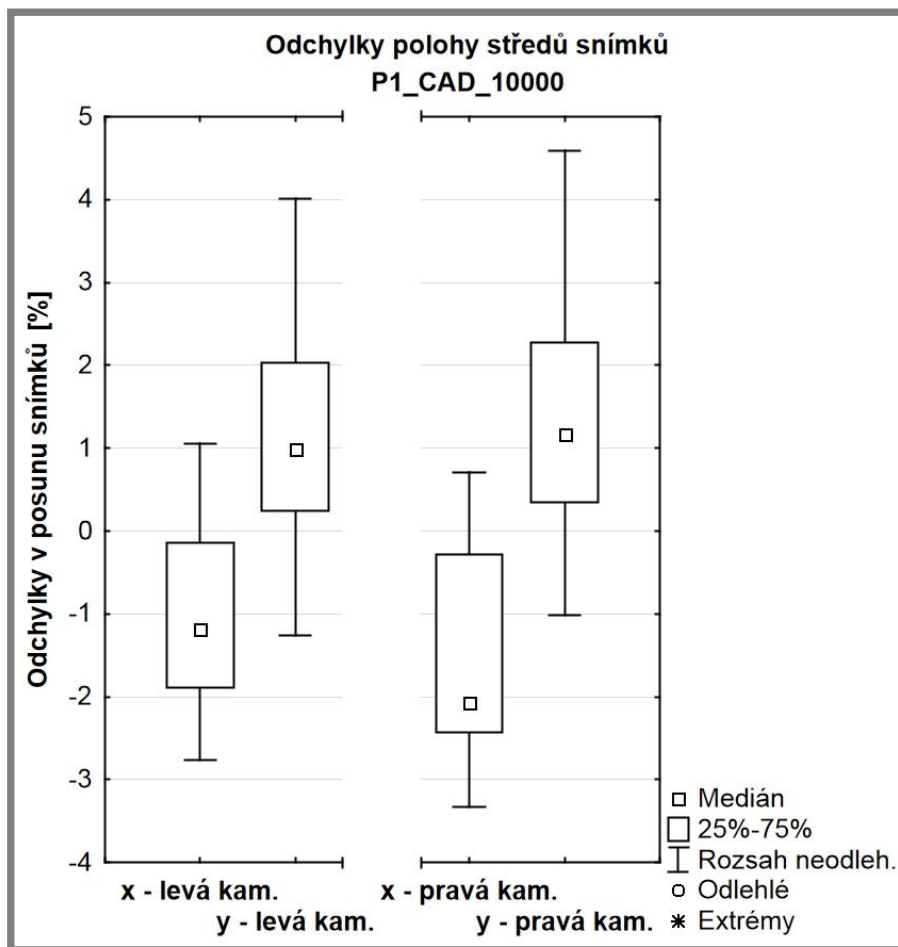
Vliv hustoty polygonální sítě na čas generování pozic je zjevný, viz Tabulka 3. Jak u výpočtu map viditelnosti, tak u celkového výpočtu pozic je patrný lineární nárůst času v závislosti na počtu polygonů sítě.

5.2 Zhodnocení shody simulovaných pozic s reálnými

K porovnání shody simulovaných pozic s reálnými (na základě snímků z těchto pozic) byla vybrána data ze skenování s nastavením P1_CAD_10000 a P1_SKEN_10000.

5.2.1 Porovnání poloh středů snímků

Poloha středů snímků byla vyhodnocena zvlášť ve směru x a y pro nezávislé určení odchylek v těchto směrech. Odchylka polohy středů je vyhodnocena jako procentuální odchylka vzhledem k rozměrům reálného snímku. Graf na Obr. 5-2 zobrazuje data získaná na základě měření pro model P1_CAD_10000.



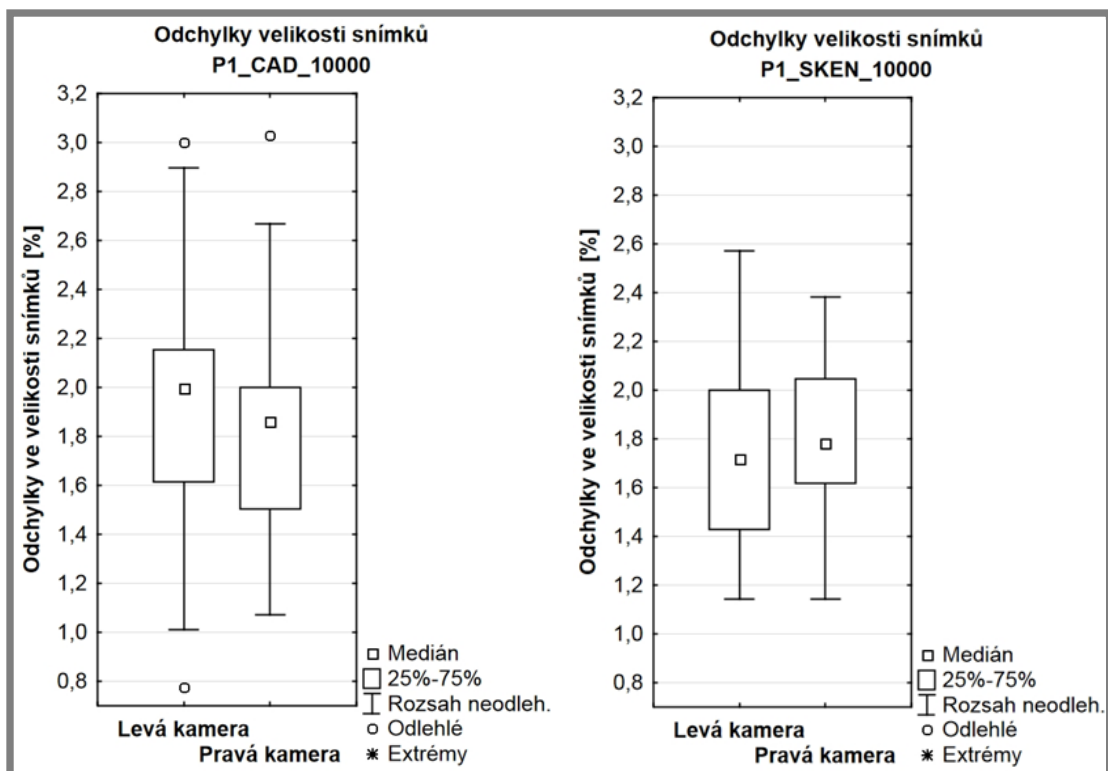
Obr. 5-1 Odchyly v poloze středů snímků u měření dle modelu P1_CAD_10000

Odchyly v poloze simulovaných a reálných snímků, jejichž medián se pohybuje do hodnot okolo 2 % a maximální odchylka je 4,6 %, lze považovat za velmi dobré. Odchyly v poloze snímků jsou nižší u modelu získaného skenováním dílu (P1_SKEN_10000).

Celkově lze odchyly v poloze snímků a tedy i poloze samotných pozic měření připsat nepřesnostem v ustavení měřeného dílu a tyto odchyly by bylo možné odstranit provedením vhodné kalibrace pro stanovení přesné polohy měřeného dílu v prostoru v porovnání s jeho modelovou polohou.

5.2.2 Porovnání velikostí snímků

Odchyly ve velikosti snímků byly porovnávány opět zvlášť pro levou a pravou kameru a byly vyhodnocovány u modelů P1_CAD_10000 a P1_SKEN_10000. Výsledky porovnání v grafické podobě jsou na Obr. 5-2.



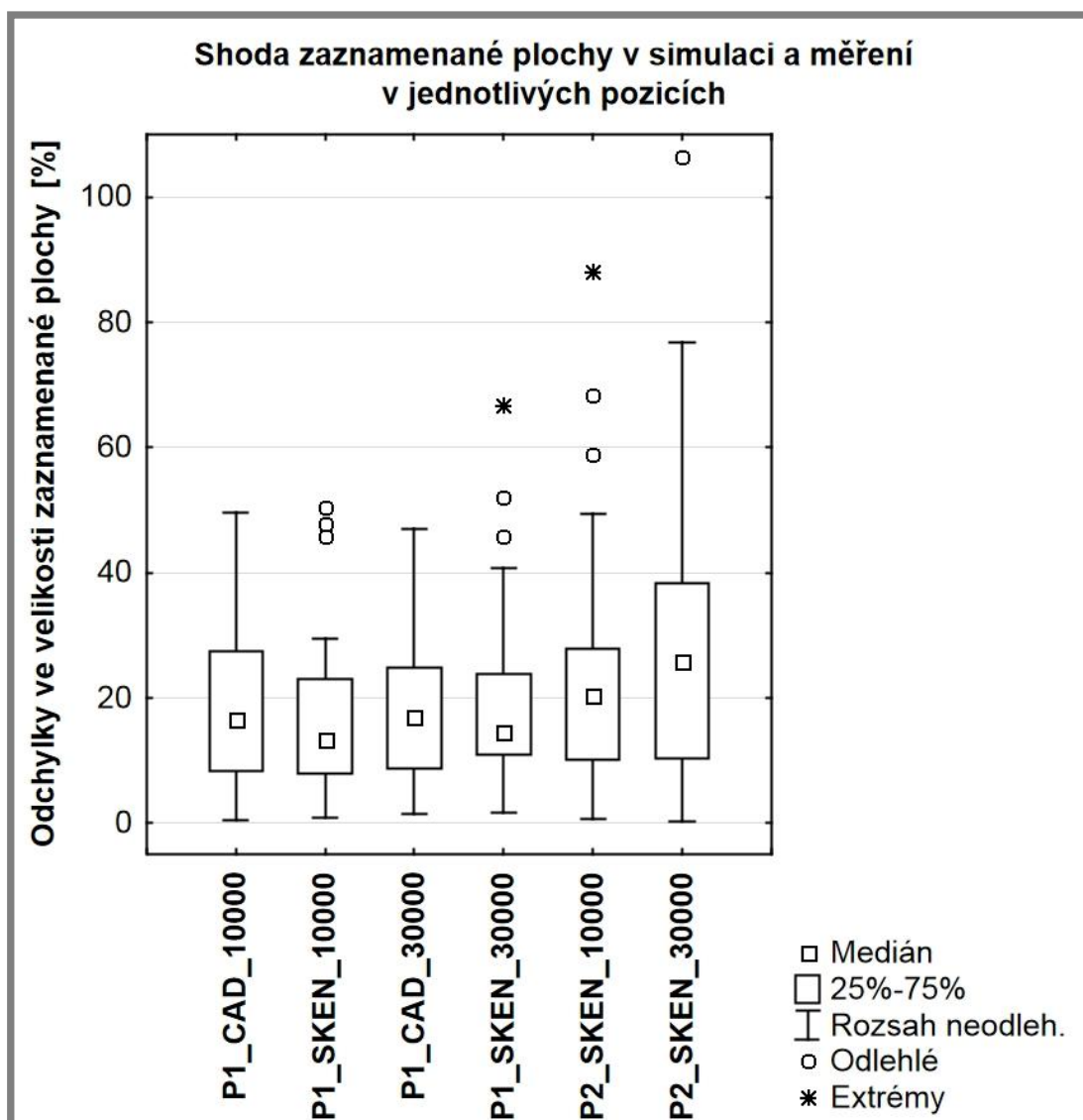
Obr. 5-2 Procentuální odchylky ve velikosti snímků u modelů P1_CAD_10000 a P1_SKEN_10000

Medián odchylek velikosti snímků se pohybuje do 2 %, což je hodnota, která simulaci ovlivňuje minimálním způsobem. Všechny hodnoty jsou kladné, protože simulovaný snímek je vždy menší než snímek z měření. Menší odchylky lze pozorovat opět u modelu P1_SKEN_10000. Vzhledem k tomu, že rozdíl hodnoty mediánu mezi těmito dvěma měřeními je na podobné úrovni jako rozdíl hodnot mezi dvojicemi kamer, lze vliv použitého modelu na velikost snímku považovat za zanedbatelný.

Odchylky ve velikosti snímku mohou být způsobeny nepřesnostmi ve vzdálenosti mezi kamerou a středem měřicího objemu odvozené a zanesené ve výpočtu. Další možností je vliv nepřesnosti v pozici báze robota v modelu a ve skutečnosti. Tento vliv by bylo možné ověřit provedením vhodné kalibrace.

5.3 Zhodnocení shody naskenované plochy v simulaci a v měření

Bylo provedeno porovnání obsahu plochy polygonů naskenovaných v reálném měření a získaného v simulaci. Výsledky byly získány pro jednotlivé skenovací pozice a byly dále vypočítány základní statistické veličiny tohoto souboru dat, viz grafická podoba na Obr. 5-3. Ze získaných dat je patrné, že rozdíl v naměřených a simulovaných plochách se pohybuje v množině reálných čísel, tedy že simulovaná plocha je vůči naměřené menší, ale i větší. Pro posouzení odchylek v následujícím grafu však byly uvažovány absolutní hodnoty těchto odchylek.



Obr. 5-3 Odchyly v zaznamenané ploše v simulaci a v měření

5.3.1 Posouzení vlivu použití skenovaného modelu místo CAD modelu

Z výsledků v těchto grafech, především z hodnoty mediánu, je patrné, že použití polygonální sítě získané skenováním fyzického dílu má kladný efekt na velikost odchylek v získaných plochách v simulaci a reálném měření. Tento kladný efekt je možné připsat větší shodě v simulované a skutečné pozici vůči měřenému dílu a tím pádem i přesnější simulaci. Z hodnot mediánu je však zároveň patrné, že tento rozdíl není příliš velký.

Z praktického hlediska je však aplikace uvedených závěrů spíše nereálná. Znamenalo by to získat data fyzického měřeného dílu pro samotné generování pozic, což je absurdní. Reálně se však jeví praxe, která se poměrně často využívá, kdy se data měřených dílů porovnávají s prvním kusem v sérii. Z naskenovaných dat prvního kusu série by tedy mohly být zároveň generovány pozice měření pro celou sérii.

5.3.2 Posouzení vlivu hustoty polygonální sítě

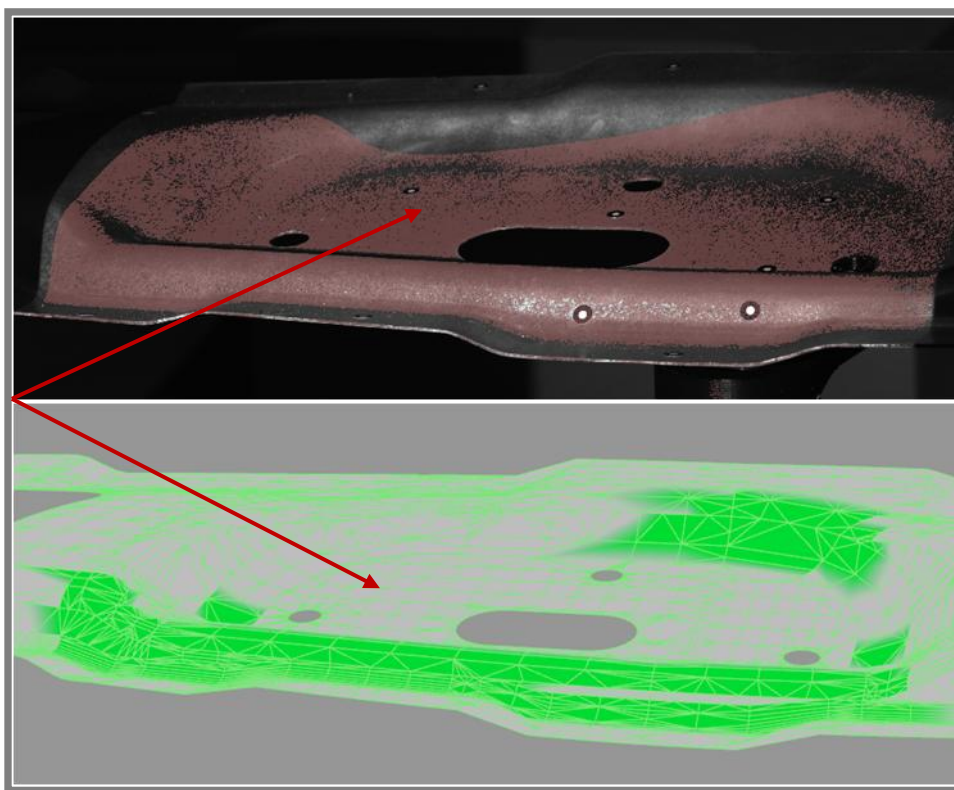
Vliv hustoty polygonální sítě na odchylky v naskenované ploše byl porovnáván u dvojic P1_CAD_10000/30000, P1_SKEN_10000/30000 a P2_SKEN_10000/30000. Z grafu na Obr. 5-3 pro tyto dvojice vyplývá, že tento vliv není u dílu Plech1 pozorovatelný. Velmi blízké jsou jak hodnoty mediánu, tak i kvartily $Q_{0,25}$ a $Q_{0,75}$. Celkově lze tedy považovat vliv hustoty polygonální sítě na odchylky v naskenované ploše v simulaci a reálném měření u provedených měření u dílu Plech1 za zanedbatelný.

U dílu Plech2 jsou rozdíly v odchylkách větší. Způsobeno to bude pravděpodobně větším počtem pozic měření u P2_SKEN_30000, které byly vygenerovány z důvodu většího množství malých polygonů na okrajích dílu. Pro vyvození obecnějších závěrů by však bylo nutné provést simulaci a měření s větším množstvím nastavení hustoty polygonální sítě, což je však značně časově náročné.

5.3.3 Posouzení vlivu osvětlovacího modelu

Správné nastavení parametrů osvětlovacího modelu má zásadní vliv na korektní simulaci měření. V případě dílu Plech2, na který byly aplikovány parametry získané pro materiál dílu Plech1, jsou z výsledků patrné větší odchylky zaznamenané plochy. Ve srovnání s výsledky pro model P1_SKEN (jedná se také o model získaný skenováním fyzického dílu) je medián těchto odchylek větší o (7 – 12,4) %.

Zároveň je značný vliv správného nastavení parametrů modelu možné pozorovat u dílu Plech1, pro nějž byly tyto parametry experimentálně odvozeny. Odchylky dosahují jak kladných tak záporných hodnot. Nelze tedy jednoznačně říct, že je osvětlovací model nastaven příliš konzervativně a nezaznamenává polygony s příliš vysokou vypočítanou hodnotou šedi nebo naopak s příliš nízkou. Příkladem může být záběr z pozice 12 při měření dle modelu P1_CAD_10000 na Obr. 5-4.



Obr. 5-4 Rozdíl v simulované a naměřené ploše u dílu Plech1 v pozici 12

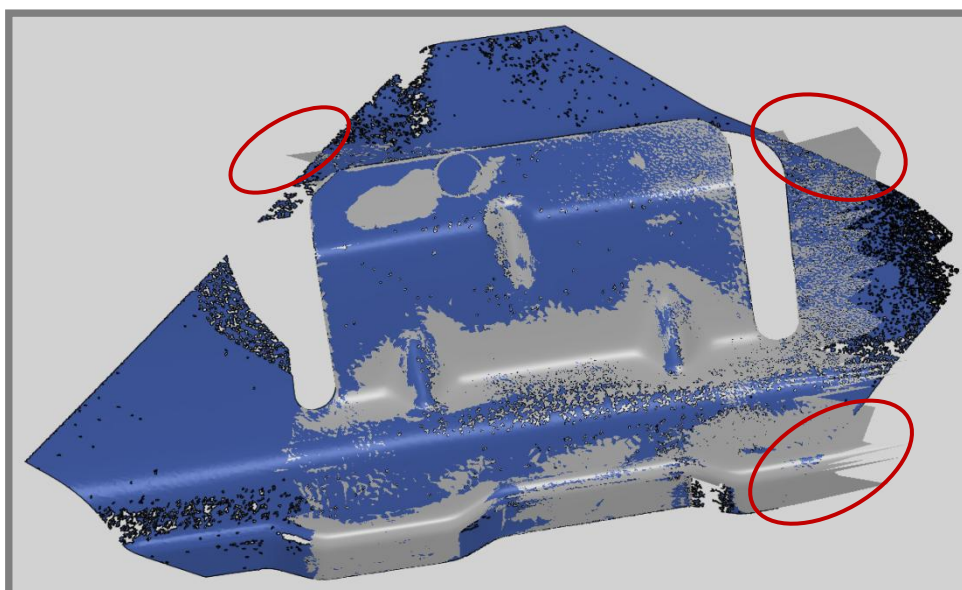
5.4 Zhodnocení zaznamenání polygonů segmentů

Pro zhodnocení navržené metody segmentace dílu byla porovnáována celková plocha polygonů segmentu s plochou segmentu, která byla v příslušném záběru, vygenerovaném pro tento segment, naskenována. K tomuto hodnocení bylo zvoleno měření na základě modelů P1_SKEN_10000 a P1_CAD_10000. Výsledky hodnocení obsahuje Tabulka 4.

Tabulka 4 Výsledky porovnání zaznamenání polygonů segmentu z příslušné pozice v [%]

Model	Min	Q _{0,25}	Medián	Q _{0,75}	Max	Rozpětí
P1_SKEN_10000	0	5,21	15,82	23,53	39,22	96,71
P1_CAD_10000	0	3,47	8,82	18,50	33,99	49,48

Z výsledků zaznamenání polygonů segmentů je zřejmé, že medián odchylek je u dvou zkoumaných měření v rozmezí (8,8 – 15,8) %. Pokud uvažujeme, že segmenty jsou vytvořeny tak, aby se polygony do nich spadající v příslušných pohledech naskenovaly, je to hodnota poměrně vysoká. Jedním důvodem, proč se polygony nezaznamenají, je přítomnost odlesků, které při segmentaci není možné uvažovat. Druhým důvodem je fakt, že při natočení skeneru vůči segmentu o 45°, podobně jako na Obr. 5-5, budou části segmentu mimo zorné pole skeneru. Předmětem dalšího testování bude tedy dělení dílu na menší segmenty.



Obr. 5-5 Nenaskenované části segmentu, způsobeno natočením skeneru

6 DISKUSE A VYPLÝVAJÍCÍ NÁVRHY NA OPTIMALIZACI

V následujících oddílech je zhodnocena navržená metodika a především jednotlivé použité metody a jsou uvedeny možnosti optimalizace těchto metod, které vyvstaly v průběhu řešení a díky analýze výsledků.

Metoda segmentace

Navržená metoda segmentace se u měření testovacích dílů ukázala jako poměrně dobrá, což dokládají výsledky v předchozí kapitole. Zároveň se ukázaly některé její nedostatky:

1. Vytváření malých segmentů kvůli chybně orientovaným polygonům
2. U velkých plošných dílů nepoměr ve velikosti vytvořených segmentů
3. Nenaskenování částí segmentů z důvodů jeho velikosti a orientaci skeneru

Optimalizace

Problém s chybně orientovanými polygony na okrajích dílu by mohl být odstraněn vhodnou metodou filtrace před samotnou segmentací. Jedná se také o problém vznikající především u modelů ze skenovaných dat, které se v praxi nevyužívají tak často. Problém v nepoměru velikosti segmentů lze vyřešit dělením dle povrchových normál na menší segmenty (menší rozpětí prostorových úhlů spadá do jednoho segmentu). Velikost segmentu bude dále předmětem testování a měl by tím být odstraněn i problém s polygony segmentu přesahujícími zorné pole skeneru.

Výpočet map viditelnosti

Velkou část výpočetního času v přípravě pozic tvoří výpočet map viditelnosti (cca 70 – 85 %). Tento čas je navíc lineárně závislý na počtu polygonů použité sítě. V případě potřeby použití hustší sítě to zároveň znamená značný nárůst času.

Optimalizace

Ke zkrácení tohoto času by došlo při použití polygonální sítě s menší hustotou pouze pro výpočet map viditelnosti. Následná simulace, která ověřuje skutečnou viditelnost polygonů, by již probíhala na původní hustší síti.

Počet pozic měření (a možnosti jeho snížení)

Se současným řešením se podařilo u testovaných vzorků dosáhnout na počet pozic o (6,5 – 33) % vyšší než při ruční přípravě pozic. Vyšší počet pozic se projevil zejména při dělení sítě na vyšší počet polygonů a při použití sítě ze skenování fyzického dílu, což vedlo k přípravě pozic pro větší počet segmentů. Výsledné záběry se ale často alespoň částečně překrývají a přinášejí velmi málo nových naskenovaných dat.

Optimalizace

U vygenerovaných pozic dochází k průniku množin polygonů, které se z těchto pozic naskenují, a proto jsou některé pozice nadbytečné. Pokrytí dílu z určitého množství pozic je známý optimalizační problém označovaný jako Set Cover Problem (SCP). U tohoto problému je hladový algoritmus nejlepším řešením na obecný případ. Ve specifických případech jsou lepší jiná řešení. Problém s pokrytím všech polygonů dílu pohledy skeneru je však možné řešit mezi obecné případy.

Redukci pozic touto optimalizací bude nicméně možné použít až v případě, kdy bude dosažena vyšší shoda mezi simulací a reálným měřením.

Osvětlovací model

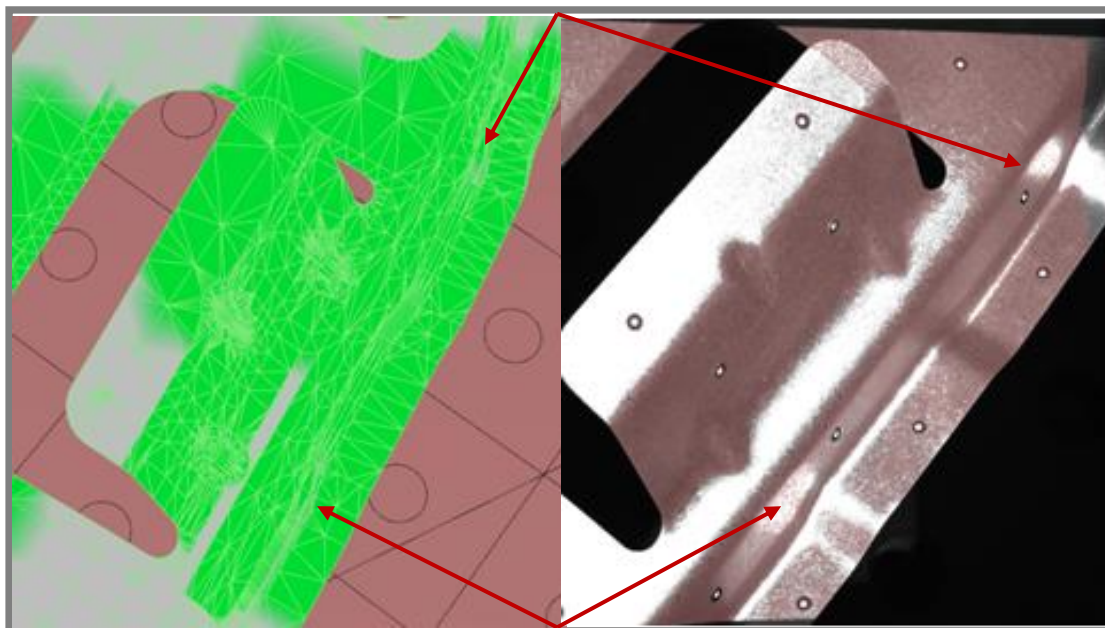
Použitý Nayarův osvětlovací model se v práci osvědčil. Především pak jeho implementace, která umožňuje výpočet expozičních časů, které mají být použity pro měření.

U provedených měření se vyskytl očekávaný problém s místy na měřeném dílu, kde mají plochy konvexní tvar. V těchto místech je naskenování velmi problematické z důvodu vícenásobných odlesků světla (viz Obr. 6-1). Tento problém nelze vyřešit žádným osvětlovacím modelem, protože ten vícenásobné odlesky neřeší.

Vliv parametrů osvětlovacího modelu při použití na odlišný materiál se ukázal jako méně zásadní, než bylo předpokládáno.

Optimalizace

V některých případech lze problém vícenásobných odlesků alespoň částečně řešit optimalizací navržené pozice. Dalším možným řešením je promítnutí světelného vzoru na část zakřivené plochy a následně ve stejné pozici na zbývající část. Odlišným řešením je pak využití metody sledování paprsku (ray tracing) a renderování scény z daného pohledu. Metoda sledování paprsku používaná pro přesné vykreslení scény je velmi časově náročná. Pro tuto aplikaci by však mohla být upravena, protože není nutné vykreslovat realisticky celou scénu, ale pouze určit příspěvky jasů z odlesků.



Obr. 6-1 Přesvětlená místa vzniklá vícenásobným odrazem

Referenční body na dílu

Nevýhodou v současném řešení je umístění referenčních bodů (kruhové kontrastní značky) na měřeném dílu. Tyto body slouží k zarovnání záběrů z jednotlivých pozic do jednoho souřadného systému a následně k vytvoření jedné polygonální sítě. V sériovém měření není možné body na každý měřený díl umisťovat. Velké

množství referenčních bodů, použité při testovacích měřeních, bylo způsobeno použitím malého měřicího objemu. Na jeho použití se ale zároveň měl prokázat přínos nebo zhoršení v počtu vygenerovaných pozic.

Optimalizace

Problém referenčních bodů je možné vyřešit použitím upínacího rámečku, na kterém budou umístěny referenční body. Tento rámeček by bylo nutné v praxi použít i při ruční přípravě pozic. Do simulace by se následně přidal krok kontrolující viditelnost referenčních bodů (se známou polohou v modelu) z dané pozice.

Přesnost ustavení fyzického dílu

Zásadní vliv na přesnost simulace má správné ustavení měřeného dílu v porovnání s modelem. To se projevilo v odchylkách u zarovnání snímků v kapitole 5.2 a také u shody naskenované a simulované plochy polygonů popsané v kapitole 5.3.

Optimalizace

Problém přesného ustavení měřeného dílu je možné řešit vhodnou metodou kalibrace. Zvlášť v případě použití měřicího rámečku, do kterého se bude umisťovat měřený díl, by bylo možné polohu tohoto rámečku (a referenčních bodů na něm) stanovit například na základě fotogrammetrického měření. To by bylo provedeno na robotu ve známé poloze a měřicího rámečku.

Řízení robota

Ve fázi automatického skenování (které již nebylo součástí samotné práce) je v současném řešení robot řízen zvlášť z ovládacího panelu KUKA KCP2 a spouštění skenování z ovládacího počítače 3D skeneru. Pokud se v budoucnu podaří navržené řešení dopracovat a dovést do kompletní podoby i s automatickým skenováním, bylo by takové řešení nepoužitelné.

Optimalizace

Propojení řízení robota se samotným skenováním by bylo možné řešit pomocí toolboxu pro Matlab, KUKA Control Toolbox (KCT). Díky tomuto toolboxu by mělo být možné spojit dohromady příkazy pro přesun robota mezi jednotlivými pozicemi s příkazy pro samotné 3D skenování odesílané do softwaru ATOS Professional.

7 ZÁVĚR

Hlavním cílem práce byl *návrh metodiky automatizace procesu 3D digitalizace plechových dílů ve fázi generování měřicích pozic skeneru s využitím průmyslového robota*. Na základě rešeršní studie byla vyhodnocena absence systému schopného automaticky navrhnout pozice měření pro tvarově složitější plechové díly na základě jejich CAD modelu, s vysokou přesností digitalizovat plochu celého měřeného dílu a simulací ověřit dostupnost pozic pro měření s robotem. K tomuto řešení byl zvolen dvoukamerový skener s proužkovou projekcí a pro simulaci skutečné viditelnosti byl aplikován Nayarův osvětlovací model. V práci byly navrženy implementovány dílčí metody. Byla využita známá metoda map viditelnosti a dále byly navrženy a aplikovány vlastní metody pro segmentaci dílu, metriku hodnocení pozic a upraven byl algoritmus pro hledání nejkratší cesty robota založený na řešení TSP. Byl vytvořen kompletní software v podobě pluginu do softwaru Rhinoceros.

Navržená metodika byla *experimentálně ověřena* pomocí měření dvou plechových dílů a s využitím 3D skeneru ATOS Triple Scan a průmyslového robota KUKA KR60HA. Pro ověření metodiky byly připraveny čtyři modely prvního dílu (Plech1) a dva modely druhého dílu (Plech2). Tyto modely se lišily v hustotě polygonální sítě a v případě dílu Plech1 v původu získaných dat. Dva modely vycházejí z CAD modelu a dva modely z naskenovaného fyzického dílu. Měření a zpracování naměřených dat probíhalo v softwaru ATOS Professional.

S využitím naměřených dat bylo provedeno *zhodnocení navržené metodiky* a posouzení vlivů na dosahované výsledky. Z posouzení časové náročnosti výpočtu pozic v porovnání s jejich ruční přípravou vyplývá, že navržené řešení přináší časovou úsporu v rozmezí (50 – 85) %. Čas výpočtu je závislý zejména na počtu polygonů použité sítě modelu a tato závislost je přibližně lineární. Z hlediska počtu připravených pozic měření bylo dosaženo hodnot o (6,5 – 33) % vyšších než při ruční přípravě. Byl prokázán vliv hustoty polygonální sítě na počet vygenerovaných pozic. U provedených experimentálních měření bylo dosaženo naskenování plochy dílu v odchylkách maximálně do 1 % z celkové plochy dílu. Shoda simulace a skutečného měření byla posouzena na základě shody naskenované plochy. Zde byly výsledkem odchylky mediánu do 17 % resp. 26 % v případě dílu Plech1 resp. dílu Plech2. Dále bylo zjištěno, že při měření dle modelu získaného skenováním fyzického dílu bylo dosaženo větší shody naskenované plochy v simulaci a měření než v případě modelu z CAD. Tento závěr platí i pro různou hustotu sítě těchto modelů. Potvrdil se předpoklad, že přesnější model (získaný skenováním fyzického dílu) má pozitivní vliv na shodu simulace s měřením. Hodnocena byla také navržená metoda segmentace. U ní se prokázaly odchylky ve schopnosti zaznamenat vybraný segment z příslušné pozice v hodnotě mediánu (8,8 – 15,8) %.

V rámci této dizertační práce bylo navrženo řešení, které rozšiřuje předchozí práce aplikací osvětlovacího modelu, stanovením expozičních časů skenování na základě simulace a simulací dostupnosti robota do pozic měření. Přínosem práce je porovnání simulace se skutečnými výsledky měření. Výsledky prokazují přínos navržené metodiky v přípravné fázi automatizované digitalizace plechových dílů.

Optimalizace v navržené metodice je dále možná a předpokládá se její realizace v oblasti kalibrace pozice měřeného dílu, segmentace měřeného dílu, zrychlení výpočtu map viditelnosti, zlepšení parametrů osvětlovacího modelu nebo případně implementace metody sledování paprsku a řízení robota přímo propojené se skenováním. Všechny stanovené cíle práce byly splněny.

8 SEZNAM LITERATURY

- [1] NEWMAN, Timothy S. a Anil K. JAIN. A Survey of Automated Visual Inspection. *Computer Vision and Image Understanding*. 1995, Vol. 61, issue 2, s. 231-262. ISSN 10773142. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S107731428571017X>
- [2] ELMARAGHY, H. a W. ELMARAGHY. Computer-Aided Inspection Planning (CAIP). SHAH, Jami J, Martti MÄNTYLÄ a Dana S NAU. *Advances in feature based manufacturing*. New York: Elsevier, 1994, s. 363-396. ISBN 0444816003.
- [3] LUHMANN, Thomas. *Close range photogrammetry: principles, methods and applications*. Dunbeath: Whittles, 2006. ISBN 978-1870325-50-9.
- [4] BELLOCCHIO, Francesco. *3D Surface Reconstruction: Multi-Scale Hierarchical Approaches*. New York: Springer, c2013, 162 p. ISBN 978-1-4614-5632-2.
- [5] BATLLE, J., E. MOUADDIB a J. SALVI. Recent progress in coded structured light as a technique to solve the correspondence problem. *Pattern Recognition*. 1998, Vol. 31, issue 7, s. 963-982. ISSN 00313203. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0031320397000745>
- [6] GORTHI, Sai Siva a Pramod RASTOGI. Fringe projection techniques: Whither we are?. *Optics and Lasers in Engineering*. 2010, Vol. 48, issue 2, s. 133-140. ISSN 01438166. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0143816609002164>
- [7] PRIETO, F., T. REDARCE, P. BOULANGER a R. LEPAGE. CAD-based range sensor placement for optimum 3D data acquisition. In: *Second International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling (Cat. No.PR00062)*. Ottawa, Ont.: IEEE Comput. Soc, 1999, s. 128-137. ISBN 0-7695-0062-5. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=805343>
- [8] PRIETO, Flavio, Richard LEPAGE, Pierre BOULANGER a Tanneguy REDARCE. Inspection of 3D parts using high accuracy range data. In: *Machine Vision Applications in Industrial Inspection VIII*. San Jose, CA, USA: SPIE, 2000, s. 82-93.
- [9] PRIETO, F., T. REDARCE, R. LEPAGE a P. BOULANGER. An Automated Inspection System. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2002, Vol. 19, issue 12, s. 917-925. ISSN 0268-3768. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s001700200104>
- [10] MARTINS, Fernando António Rodrigues, Jaime Gómez GARCÍA-BERMEJO, Eduardo Zalama CASANOVA a José. R. PERÁN GONZÁLEZ. Automated 3D surface scanning based on CAD model. *Mechatronics*. 2005, Vol. 15, issue 7, s. 837-857. ISSN 09574158. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0957415805000371>
- [11] MAHMUD, Mussa, David JOANNIC, Michaël ROY, Ahmed ISHEIL a Jean-François FONTAINE. 3D part inspection path planning of a laser scanner with control on the uncertainty. *Computer-Aided Design*. 2011, Vol. 43, issue 4, s. 345-355. ISSN 00104485. Dostupné z:

-
- <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0010448510002472>
- [12] GERMANI, Michele, Maura MENGONI a Roberto RAFFAELI. Automation of 3D view acquisition for geometric tolerances verification. In: *2009 IEEE 12th International Conference on Computer Vision Workshops, ICCV Workshops*. Kyoto: IEEE, 2009, s. 1710-1717. ISBN 978-1-4244-4442-7. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5457489>
- [13] GERMANI, Michele, Ferruccio MANDORLI, Maura MENGONI a Roberto RAFFAELI. CAD-based environment to bridge the gap between product design and tolerance control. *Precision Engineering*. 2010, Vol. 34, issue 1, s. 7-15. ISSN 01416359. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0141635908001207>
- [14] RAFFAELI, Roberto, Maura MENGONI, Michele GERMANI a Ferruccio MANDORLI. Off-line view planning for the inspection of mechanical parts. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*. 2013, Vol. 7, issue 1, s. 1-12. ISSN 1955-2513. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s12008-012-0160-1>
- [15] RAFFAELI, Roberto, Maura MENGONI a Michele GERMANI. Context Dependent Automatic View Planning: The Inspection of Mechanical Components. *Computer-Aided Design and Applications*. 2013, Vol. 10, issue 1, s. 111-127. ISSN 1686-4360. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.3722/cadaps.2013.111-127>
- [16] SHENG, Weihua, Ning XI, Mumin SONG, Yifan CHEN a J.S. RANKIN. Automated CAD-guided automobile part dimensional inspection. In: *Proceedings 2000 ICRA. Millennium Conference. IEEE International Conference on Robotics and Automation. Symposia Proceedings (Cat. No.00CH37065)*. San Francisco, CA: IEEE, 2000, s. 1157-1162. ISBN 0-7803-5886-4. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=844755>
- [17] SHENG, Weihua, Ning XI, Jindong TAN, Mumin SONG a Yifan CHEN. Minimum viewpoint planning for dimensional inspection of sheet metal parts. In: *Proceedings 2003 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM 2003)*. IEEE, 2003, s. 1049-1054. ISBN 0-7803-7759-1. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1225487>
- [18] QUAN SHI, NING XI, WEIHUA SHENG a YIFAN CHEN. Development of dynamic inspection methods for dimensional measurement of automotive body parts. In: *Proceedings 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2006. ICRA 2006*. IEEE, 2006, s. 315-320. ISBN 0-7803-9505-0. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1641730>
- [19] SHENG, Weihua, Ning XI, Mumin SONG a Yifan CHEN. CAD-guided sensor planning for dimensional inspection in automotive manufacturing. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. 2003, Vol. 8, issue 3, s. 372-380. ISSN 1083-4435. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1232297>

-
- [20] SHI, Quan, Ning XI, Heping CHEN a Yifan CHEN. Integrated Process for Measurement of Free-Form Automotive Part Surface Using a Digital Area Sensor. In: *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Barcelona, Spain: IEEE, 2005, s. 578-583. ISBN 0-7803-8914-x. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1570180>
- [21] SHI, Quan, Ning XI a Weihua SHENG. Recursive Measurement Process for Improving Accuracy of Dimensional Inspection of Automotive Body Parts. In: *Proceedings 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Roma, Italy: IEEE, 2007, s. 4764-4769. ISBN 1-4244-0602-1. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4209831>
- [22] MANN, S. a R. W. PICARD. Being 'undigital' with digital cameras: Extending Dynamic Range by Combining Differently Exposed Pictures. In: *IS&T's 48th annual conference, Cambridge, Massachusetts, May 1995*. Cambridge, Massachusetts: Society for Imaging Science and Technology, 1995, s. 422-428.
- [23] YAU, Shing-Tung a Song ZHANG. High dynamic range scanning technique. *Optical Engineering*. 2009-03, Vol. 48, issue 3, s. 033604-. ISSN 0091-3286. Dostupné z: <http://opticalengineering.spiedigitallibrary.org/article.aspx?doi=10.1117/1.3099720>
- [24] SKOCAJ, D. a A. LEONARDIS. Range image acquisition of objects with non-uniform albedo using structured light range sensor. In: *Proceedings 15th International Conference on Pattern Recognition. ICPR-2000*. Barcelona: IEEE Comput. Soc, 2000, s. 778-781. ISBN 0-7695-0750-6. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=905506>
- [25] JIANG, Hongzhi, Huijie ZHAO a Xudong LI. High dynamic range fringe acquisition: A novel 3-D scanning technique for high-reflective surfaces. *Optics and Lasers in Engineering*. 2012, Vol. 50, issue 10, s. 1484-1493. ISSN 01438166. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0143816612000978>
- [26] ZHAO, Huijie, Xiaoyue LIANG, Xiaochun DIAO a Hongzhi JIANG. Rapid in-situ 3D measurement of shiny object based on fast and high dynamic range digital fringe projector. *Optics and Lasers in Engineering*. 2014, Vol. 54, s. 170-174. ISSN 01438166. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0143816613002455>
- [27] GUPTA, Mohit, Amit AGRAWAL, Ashok VEERARAGHAVAN a Srinivasa G. NARASIMHAN. Structured light 3D scanning in the presence of global illumination. In: *CVPR 2011*. Providence, RI: IEEE, 2011, s. 713-720. ISBN 978-1-4577-0394-2. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5995321>
- [28] NAYAR, S.K., K. IKEUCHI a T. KANADE. Surface reflection: physical and geometrical perspectives. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 1991, Vol. 13, issue 7, s. 611-634. ISSN 01628828. Dostupné z:
-

-
- <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=85654>
- [29] ELLENRIEDER, Marc M., Christian WOHLER a Pablo D'ANGELO. Reflectivity function based illumination and sensor planning for industrial inspection. In: OSTEN, Wolfgang (ed.), Christophe GORECKI (ed.) a Erik L. NOVAK (ed.). *Optical Measurement Systems for Industrial Inspection IV*. Munich, Germany: SPIE, 2005, s. 89-98. Dostupné z: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?articleid=866999>
- [30] WIKIMEDIA FOUNDATION. Ortodroma. In: WIKIMEDIA FOUNDATION. *Wikipedie: Otevřená encyklopedie* [online]. 2013 [cit. 2014-07-07]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Ortodroma>
- [31] VENESS, Chris. Calculate distance, bearing and more between Latitude/Longitude points. In: *Movable Type Scripts* [online]. 2002-2014 [cit. 2014-08-29]. Dostupné z: <http://www.movable-type.co.uk/scripts/latlong.html>
- [32] SHENG, Weihua, Ning XI, Mumin SONG a Yifan CHEN. Near-optimal-time path planning in CAD-guided part dimensional inspection. In: *Proceedings of the 15th IFAC World Congress*. Barcelona, Spain, 2002, s. 21-21. Dostupné z: <http://www.ifac-papersonline.net/Detailed/25656.html>
- [33] SHINTYAKOV, Dmitry. tsp-solver. In: *GitHub* [online]. 2011 [cit. 2014-06-25]. Dostupné z: <https://github.com/dmishin/tsp-solver>
- [34] WECKENMANN, Albert, Wito HARTMANN, Johannes WEICKMANN, Angela DUPARRÉ a Roland GEYL. Model and simulation of fringe projection measurements as part of an assistance system for multi-component fringe projection sensors. In: *Proc. SPIE 7102, Optical Fabrication, Testing, and Metrology III, 71020N*. Glasgow, Scotland, United Kingdom: SPIE, 2008. Dostupné z: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?articleid=795982>
- [35] Exkluzivní disjunkce. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2014-11-12]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Exkluzivní%AD_disjunkce

9 PUBLIKACE A PRODUKTY AUTORA

Publikace k problematice disertační práce:

1. KOUTECKÝ, Tomáš, David PALOUŠEK a Jan BRANDEJS. Analysis of sheet metal parts behaviour during fringe projection based digitization. In: Sborník příspěvků z mezinárodní vědecké konference MMK2013: Mezinárodní Masarykova konference pro doktorandy a mladé vědecké pracovníky. Hradec Králové: Magnanimitas, 2013, s. 3499-3508. ISBN 978-80-87952-00-9.
2. PALOUŠEK, David, Milan OMASTA, Daniel KOUTNÝ, Josef BEDNÁŘ, Tomáš KOUTECKÝ a Filip DOKOUPIL. Effect of matte coating on 3D optical measurement accuracy. *Optical Materials*. 2015. DOI: 10.1016/j.optmat.2014.11.020.

Další publikace z oblasti digitalizace a automatizace v metrologii:

3. KOUTECKÝ, Tomáš, David PALOUŠEK a Jan BRANDEJS. Method of photogrammetric measurement automation using TRITOP system and industrial robot. *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*. 2013, vol. 124, issue 18, s. 3705-3709. DOI: 10.1016/j.ijleo.2012.11.024. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0030402612009199>
4. KOUTECKÝ, T., J. BRANDEJS a D. PALOUŠEK. Metodika automatizace fotogrammetrického měření systémem TRITOP. In: *Sborník referátů: 52. konference kateder částí a mechanismů strojů s mezinárodní účastí: 6.-9.9.2011, Ostravice, horský hotel Sepetná*. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2011, s. 121-126. ISBN 978-80-248-2450-5.
5. KOUTNÝ, D.; PALOUŠEK, D.; KOUTECKÝ, T.; ZATOČILOVÁ, A.; JANDA, M. 3D Digitalization Of The Human Body For Use In Orthotics And Prosthetics. *An international Journal of Science, Engineering and Technology, World Academy of Science Engineering and Technology*, 2012, roč. 2012, č. 72, s. 1000-1005. ISSN: 2010- 376X.

Produkty:

1. KOUTECKÝ, T.; ZATOČILOVÁ, A.; PALOUŠEK, D.: 3DOS-UK- 1; *3D optický skener*. Laboratoř č. A4/503, ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ, Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně, Technická 2896/ 2, 616 69 BRNO, Česká Republika.
2. KOUTECKÝ, T.; PALOUŠEK, D.: Adapter TT01; *Adaptér Tritop – Kuka*. Místnost A4/503, ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ, Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně, Technická 2896/2, 616 69 BRNO, Česká republika.
3. KOUTECKÝ, T.; PALOUŠEK, D.: Tritop Auto I; *Python skripty pro automatizaci sestavy TRITOP – KUKA*. ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ, Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně, Technická 2896/2, 616 69 BRNO, Česká republika.

-
4. KOUTECKÝ, T.; PALOUŠEK, D.; RANUŠA, M.; VRÁNA, R.; SABO, K.; URBAN, F.: 3DOS-UK-2; *3D laserový skener*. Laboratoř č. A4/516, ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ, Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně, Technická 2896/2, 616 69 BRNO, Česká republika.
 5. KOUTECKÝ, T.; PALOUŠEK, D.; UHLÍŘ.: UK-VIS-1; *Vizualizační prostředí pro strojírenské a umělecké aplikace*. ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ, Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně, Technická 2896/2, 616 69 BRNO, Česká republika.
 6. KOUTECKÝ, T.; PALOUŠEK, D.; KOUKAL, O.; KOBZA, M.; KŘEJČÍ, M.; MACHÁČEK, M.: 3DFAC-UK-1; *3D faciální skener*. Laboratoř č. A4/516, ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ, Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně, Technická 2896/2, 616 69 BRNO, Česká republika.

Vynálezy a autorská díla:

7. KOUTECKÝ, T.; PALOUŠEK, D.; KOUKAL, O.; SOVJÁK, R.: Průmyslový vzor; *Prostorový skener*. Číslo přihlášky: 2013-39679. Číslo zápisu: 36207. Vysoké učení technické v Brně, Antonínská 548/1, Brno, 60190, CZ.
8. KOUTECKÝ, T.; PALOUŠEK, D.; VÍTEK, J.; RANUŠA, M.: Průmyslový vzor; *Prostorový skener*. Číslo přihlášky: 2013-39633. Číslo zápisu: 36158. Vysoké učení technické v Brně, Antonínská 548/1, Brno, 60190, CZ.

10 CURRICULUM VITAE

Osobní údaje:

Ing. Tomáš Koutecký, nar. 1986 v Šumperku

Vzdělání:

- 2010 - 2014 Doktorské studium na Ústavu konstruování FSI VUT v Brně, odbor reverzního inženýrství a aditivních technologií. Téma disertační práce: Automatické generování pozic optického skeneru pro digitalizaci plechových dílů.
- 2008 - 2010 Magisterské studium na Fakultě strojního inženýrství VUT v Brně, obor Konstrukční inženýrství. Téma diplomové práce: Automatizace fotogrammetrického měření systémem TRITOP.
- 2005 - 2008 Bakalářské studium na Fakultě strojního inženýrství VUT v Brně, obor Strojní inženýrství. Téma Bakalářské práce: Konstrukční řešení transfemorálních protéz.
- 2001 - 2005 Vyšší odborná a Střední průmyslová škola Šumperk, obor Technické lyceum. Studium ukončeno maturitní zkouškou s vyznamenáním.

Výuka cvičení v předmětech:

- Reverzní inženýrství a optická digitalizace (ZRI-A)
- Parametrické modelování – Inventor, Catia, Rhinoceros (ZM1)
- Konstrukční projekt (ZKP)
- Konstrukční projekt II (ZKR)
- Inženýrský projekt (ZIP)
- CAD (3CD)
- Konstruování a CAD (4KC)
- CAD systémy I (RS1)

Praxe a zaměstnání:

- 2012 - dosud – asistent na Ústavu konstruování – odbor Reverzního inženýrství a aditivních technologií
- 2010 - 2013 Mcae systems, Kuřim - 3D skenování (Atos), fotogrammetrie (Tritop) - externí spolupráce.
- 2012 - 2014 - technický pracovník na projektu OPVK CZ.1.07/2.2.00/28.0278

Projekty:

- 2011 - 2013 - Specifický výzkum, Standardní - Vývoj zobrazovacích metod pro prezentace designérských objektů ve virtuálním prostředí (spoluřešitel).
- 2012 - Specifický výzkum, Juniorský - Tvorba strukturované geneze artefaktu metodami optické digitalizace (spoluřešitel).
- 2013 – Specifický výzkum, juniorský mezifakultní – Vizualizační jádro pro použití v umělecké tvorbě a strojírenských aplikacích (hlavní řešitel)

ABSTRAKT

Práce se zabývá návrhem metodiky pro automatické generování pozic optického skeneru pro digitalizaci plechových dílů na základě počítačového modelu měřeného dílu. Výroba a s tím související inspekce plechových dílů jsou velmi úzce spojeny s automobilním průmyslem. Kvůli obecným zvyšujícím se nárokům na přesnost je v sériové výrobě kladen požadavek na přesnou kontrolu vyráběných dílů. K tomu se stále častěji začínají využívat optické 3D skenery a průmyslové roboty. V případě zavedení výroby nového dílu a jeho automatické kontroly v procesu sériové výroby je nutné připravit pozice měření, ze kterých dojde k přesné a rychlé digitalizaci dílu pro následnou inspekci. Příprava těchto pozic probíhá nejčastěji ručním uvedením robota do daných pozic a jejich uložení. Navržená metodika řeší přípravu pozic automaticky. V práci je představena metodika návrhu pozic měření, jejich simulace na skutečnou viditelnost části dílu pomocí osvětlovacího modelu a simulace vygenerovaných pozic na dostupnost robota. Metodika byla zpracována jako plugin pro software Rhinoceros. Na základě experimentálního ověření bylo zjištěno, že dojde ke značné časové úspoře v přípravě pozic měření v porovnání s jejich ruční přípravou.

ABSTRACT

This thesis deals with the development of a new methodology for automatic generation of scanning positions based on a computer model of the part for digitization of sheet metal parts. Manufacture and related inspection of sheet metal parts are closely connected to automotive industry. Based on increasing general requirements on accuracy, there is also a requirement for accurate inspection of manufactured parts in serial-line production. Optical 3D scanners and industrial robots are used more often for that purpose. Measuring positions for accurate and fast digitization of a part need to be prepared as the manufacturing of the new part begins. Planning of such positions is done manually by positioning of the industrial robot and saving the positions. The planning of positions proposed by this methodology is done automatically. A methodology of positions planning, their simulation for true visibility of the part elements using reflectance model and a simulation of the positions for robot reachability is presented in this thesis. The entire methodology is implemented as a plug-in for the Rhinoceros software. High reduction of time in positions planning compared to the manual approach was observed in the performed experiments.