

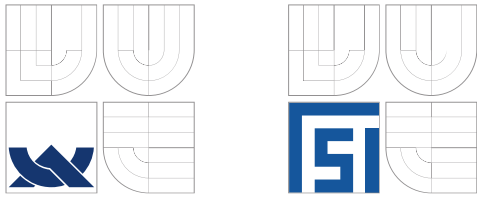
Fakulta strojního inženýrství
Ústav konstruování / Odbor metodiky konstruování

Faculty of Mechanical Engineering
Institute of Machine and Industrial Design / Department of design methodology

Automatizace 3D optického měření pomocí fotogrammetrie

[Pojednání ke státní doktorské zkoušce]
[Discourse on the Dissertation Thesis]

Autor práce: **Ing. Tomáš Koutecký**
Author



Fakulta strojního inženýrství
Ústav konstruování / Odbor metodiky konstruování

Faculty of Mechanical Engineering
Institute of Machine and Industrial Design / Department of design methodology

Automatizace 3D optického měření pomocí fotogrammetrie

[Pojednání ke státní doktorské zkoušce]
[Discourse on the Dissertation Thesis]

Autor práce: **Ing. Tomáš Koutecký**
Author

Vedoucí práce: **doc. Ing. Jan Brandejs, CSc.**
Supervisor

TATO PRÁCE JE SPOLUFINANCOVÁNA
EVROPSKÝM SOCIÁLNÍM FONDEM A STÁTNÍM ROZPOČTEM ČESKÉ REPUBLIKY.



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

OBSAH

OBSAH	3
1 ÚVOD	4
2 VYMEZENÍ ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY A PŘEDBĚŽNÉHO CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE	5
3 SHRnutí SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	6
3.1 Automatizace hledání pozic u CMM	6
3.2 Automatizace hledání pozic u laserových skenerů	10
3.3 Automatizace hledání pozic u skenerů s proužkovou projekcí.....	16
3.4 Redukce vlivu různé odrazivosti povrchu a odlesků světla	24
4 ANALÝZA, INTERPRETACE A ZHODNOCENÍ POZNATKŮ ZÍSKANÝCH NA ZÁKLADĚ REŠERŠE	29
5 VYMEZENÍ CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE A NÁVRH ZPŮSOBU JEJÍHO ŘEŠENÍ	31
6 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÍ DISERTAČNÍ PRÁCE	32
6.1 Metodika řešení.....	32
6.2 Reprezentace měřeného dílu	35
6.3 Segmentace měřeného dílu	36
6.4 Výpočet pozic měření	39
6.5 Simulace vypočítaných pozic	45
6.6 Simulace pozic robota a drah.....	46
6.7 Experimentální měření.....	47
7 ZÁVĚR	49
SEZNAM OBRÁZKŮ	50
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	51

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 proto využívají různé druhy měření, porovnání, testů a zkoušek. Inspekce může být pouze 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 inspekcí především kontrola dílů z hlediska dodržení požadovaných rozměrů a geometrie. K takové kontrole se používají jednak nástroje a zařízení využívající dotyku s měřeným dílem: posuvná měřítka, hloubkoměry, elektronické mikrometry, úchylkoměry nebo zařízení pro měření souřadnic (CMM = Coordinate Measuring Machine); nebo nověji zařízení, obecně nazývaná skenery, která zjišťují měřené hodnoty bezkontaktně. Ty 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 hojně 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 VYMEZENÍ ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY A PŘEDBĚŽNÉHO CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Pojednání ke státní doktorské zkoušce se zabývá studiem inspekčních systémů a jejich automatizací. Zvláštní pozornost je věnována automatizaci přípravné fáze u digitalizačních metod používaných v jednotlivých inspekčních systémech. Motivací ke studiu této problematiky je stále intenzivnější využití metod přesné kontroly v procesu sériové výroby dílů, zejména ve strojírenství a konkrétně v automobilovém průmyslu. A motivací pro přesnou kontrolu jsou především zvyšující se nároky na přesnost výroby dílů. Inspekce je využívána v širokém spektru aplikací: kontrola GD&T (rozměrových a geometrických tolerancí), měření celkových globálních odchylek, zhodnocení celkového vzhledu produktu nebo měření odchylek specifických bodů. Automatizace vstupuje do procesu inspekce v různých fázích a na různé úrovni. Celkově však přispívá ke zrychlení a zefektivnění uvedených inspekčních úloh. Přípravná část inspekce, určení vhodných pozic měření, může být prováděna na základě zkušeností uživatele nebo být automatizována pomocí vhodných algoritmů, automatizovaného systému a robota. Některé systémy, vyvinuté pro automatizaci této fáze inspekčního procesu jsou představeny dále, chybí ale aplikace na dvoukamerový skener s proužkovou projekcí.

Předběžným cílem této dizertační práce je tedy automatizace hledání měřících pozic za použití dvoukamerového skeneru s proužkovou projekcí.

3 SHRnutí SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

Následující kapitola shrnuje současný stav poznání v oblasti automatizace inspekčních systémů v jejich přípravné fázi, tedy určení vhodných pozic měření. Rozebírá a hodnotí články z impaktovaných časopisů a konferenčních publikací. Kapitola je členěna na automatizaci inspekce strojních dílů s využitím nejrozšířenějších prostorových digitalizačních metod uplatněných u CMM, laserových skenerů a skenerů s proužkovou projekcí. Dále tato kapitola uvádí přehled metod, které redukuje negativní vlivy odlesků a různé odrazivosti skenovaných povrchů v případě využití skenerů s proužkovou projekcí.

3.1 Automatizace hledání pozic u CMM

3.1.1 AINSWORTH, I.; RISTIC, M.; BRUJIC, D.
VISUAL CAD-BASED MEASUREMENT AND PATH PLANNING FOR FREE-FORM SHAPES. In *7th International Conference in Central Europe : Computer Graphics, Visualisation and Interactive Digital Media*. Prague, Czech Republic, 1999.

Článek prezentuje způsob registrace CAD dat a souřadného systému CMM, na němž probíhá měření. Dále definuje kritéria pro určení měřících bodů. Jejich počet a distribuce jsou řízeny řadou faktorů.

Výsledky:

Registrace u objektů se třemi ortogonálními rovinami je řešena jedním ze dvou způsobů. Prvním je registrace pomocí šesti bodů (3, 2 a 1 na jednotlivých rovinách). Druhým způsobem je registrace pomocí šesti náhodných bodů na objektu, které korespondují se stejnými body na CAD datech.

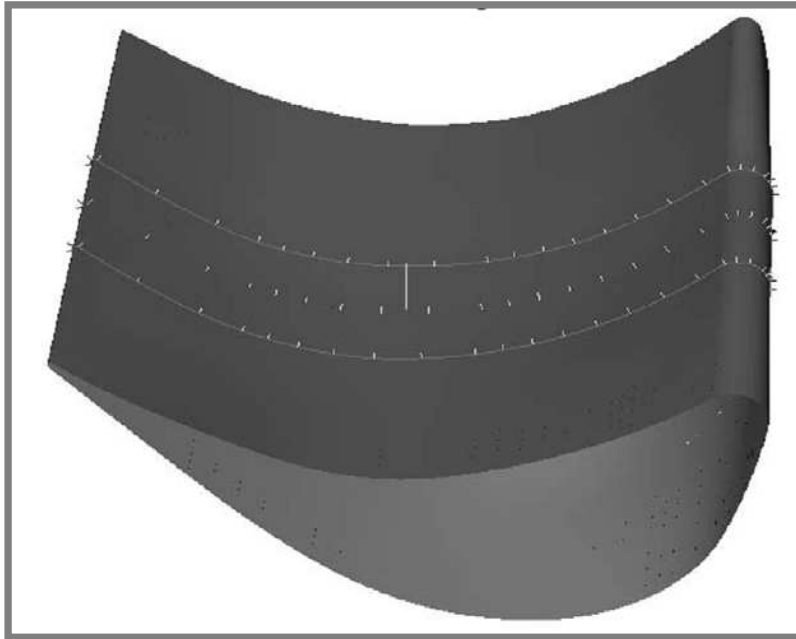
U objektů s volnými plochami však předchozí postupy nelze použít. Registrace je proto řešena vytvořením odsazených NURBS ploch, jejichž vzdálenost je rovna poloměru měřící sondy. Pomocí šesti a více iniciačních bodů naměřených ručně a vyznačených na CAD datech se tyto dva celky k sobě přiblíží. Následně je použit ICP algoritmus.

Pro volbu vhodných měřících bodů jsou použita následující kritéria vzorkování:

- *rovnoměrné vzorkování* – na měřený povrch je promítnuta obdélníková síť. Obdélníková síť je rovnoměrná, na povrchu objektu však rozmístění bodů být rovnoměrné nemusí.
- *vzorkování dle křivosti* – toto kritérium umožňuje vytvoření většího množství bodů v místech s větší křivostí (ukázka na Obr. 1)
- *kritérium nejmenší vzorkovací hustoty* – toto kritérium definuje maximální vzdálenost mezi dvěma body, která může být použita.
- *parametricky založené kritérium vzorkování* – na specifikované křivce musí být minimální počet bodů specifikovaný uživatelem.

Představený systém zahrnuje dále postupy pro generování drah tak, aby zbytečně nedocházelo k otáčení měřicí sondy. Systém zahrnuje zároveň modul pro verifikaci navržených drah v grafickém prostředí. Hlídaný jsou také případné kolize. Detekce kolizí je prováděna tak, že se kontroluje, zda dráha neprochází odsazenou plochou (o poloměr měřicí sondy).

Autoři uvádějí, že představený systém byl použit na měření různých dílů, např. lopatek turbín leteckých motorů.



Obr. 1 Generování měřících bodů na základě lokální křivosti [3]

Závěry:

Představený způsob vzorkování pro stanovení měřících pozic je poměrně jednoduchý a nezahrnuje žádné složitější postupy. Také registrace CAD dat se souřadným systémem CMM není příliš efektivní a vyžaduje značné zapojení uživatele. Studie také postrádá ukázkový příklad a nějaké porovnání měření běžné a s použitým systémem. Obecným přínosem vyššího počtu bodů na plochách s vysokou křivostí je lepší popisnost těchto volných povrchů.

3.1.2 AINSWORTH, I., RISTIC, M., BRUJIC, D.

CAD-Based Measurement Path Planning for Free-Form Shapes Using Contact Probes. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2000, roč. 16, č. 1, s. 23-31 [cit. 2012-05-29]. ISSN 0268-3768. DOI: 10.1007/PL00013128. Dostupné z: <http://www.springerlink.com/index/10.1007/PL00013128>

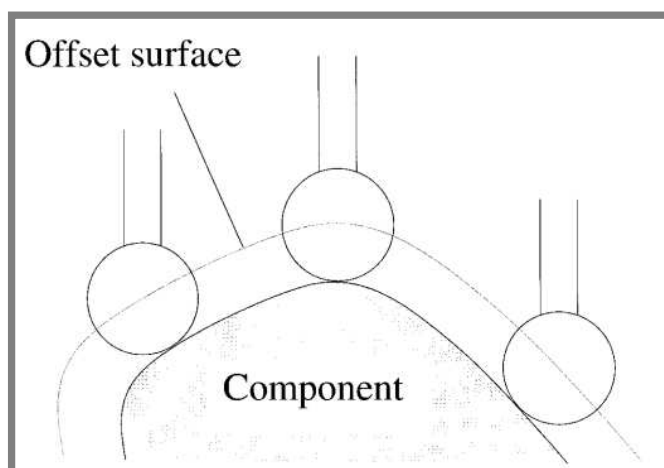
Jedná se o rozšíření předchozí studie stejných autorů. Obsahuje podrobnější způsob popisu NURBS ploch a také příklad prokazující přínos nově navrženého způsobu registrace CAD dat s CMM daty.

Výsledky:

Podobně jako předchozí studie se tato zaměřuje na metody plánování měření, registrace a kompenzaci radiusu sondy. Pro proces registrace je využita stejná metoda jako v předchozí studii, a to odsazené NURBS plochy (viz Obr. 2). Takto odsazené plochy jsou vypočteny ze vzorce:

$$O(u, v) = S(u, v) + dN(u, v) \quad (1)$$

kde $O(u, v)$ jsou odsazené plochy, $S(u, v)$ jsou původní plochy, d je vzdálenost odsazení a $N(u, v)$ jsou normály plochy. Bylo prokázáno, že vypočítané odsazené plochy $O(u, v)$, nejsou NURBS plochami. Proto je zde nutné zapojit určitou aproximaci pomocí spasování metodou nejmenších čtverců. Původní plochy jsou navzorkovány, každému vzorku jsou přiřazeny tři body a tyto jsou následně po normálách promítnuty do vzdálenosti d . Těmito promítnutými body je následně vedena aproximace odsazené plochy.



Obr. 2 Metoda registrace pomocí odsazené plochy [4]

Metoda registrace představená už v předchozí studii byla ověřena Monte Carlo simulací. K ověření byl vybrán jednoduchý objekt krychle, kde bylo možné zároveň provést klasickou registraci založenou na kompenzovaných měřeních. Měření byla opakována 30 krát, model měřeného objektu byl pokaždé transformován náhodně v rozmezí ± 1 mm a ± 1 °. Pro registraci uvedenou metodu byl použit vzorek 900 bodů. Výsledky z porovnání směrodatné odchylky, průměru a hladiny spolehlivosti chyby registrace uvedených dvou způsobů ukazují výrazné zlepšení při použití představené metody.

Závěry:

Článek popisuje navržené metody už výrazně podrobněji než předchozí, navržená metoda registrace by však zasluhovala, pokud je opravdu takovým

přínosem jak ukazují výsledky, podrobnější popis. Vhodné by bylo také ověření této metody na objektu s volnými povrchy, pro které je především určena.

3.1.3 ELKOTT, D. F., ELMARAGHY, H. A., ELMARAGHY W. H.

Automatic sampling for CMM inspection planning of free-form surfaces. *International Journal of Production Research* [online]. 2002, roč. 40, č. 11, s. 2653-2676 [cit. 2012-05-29]. ISSN 0020-7543. DOI: 10.1080/00207540210133435. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00207540210133435>

Studie se zaměřuje z celého procesu automatizace měření pomocí CMM na proces vzorkování měřeného objektu s volnými povrchy pro stanovení měřících bodů.

Výsledky:

Navrženy jsou čtyři heuristické algoritmy pro vzorkování. Vzorkování je prováděno také pomocí genetických algoritmů. Představen je dále algoritmus, který automaticky vybírá vhodný vzorkovací algoritmus podle složitosti povrchu.

Algoritmy pro vzorkování jsou následující:

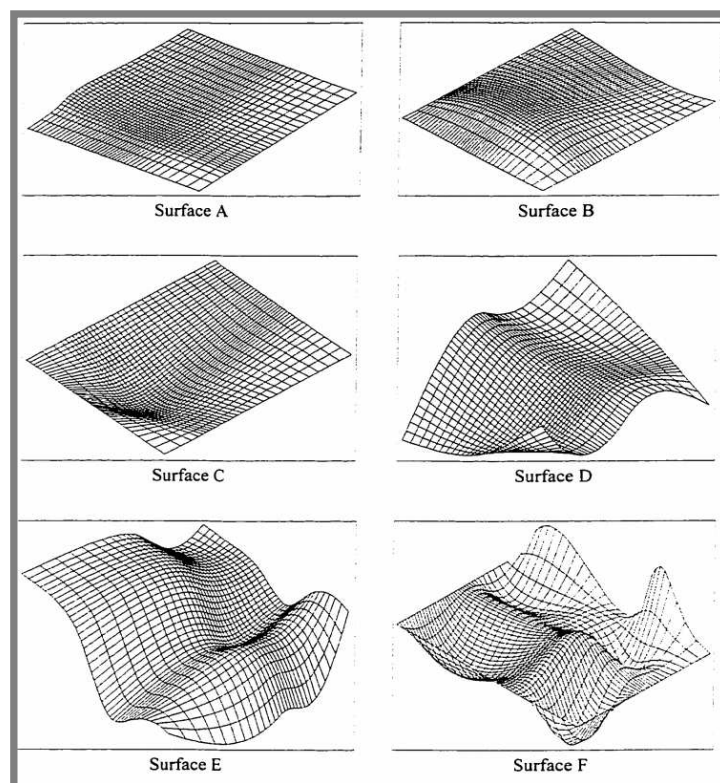
- *ekvi-parametrický* – vhodný pro plochy s malými změnami křivosti, relativně rovné povrchy
- *založený na velikosti oblasti* – vytvoří rozložení bodů závislé na velikosti dané oblasti tak, aby bylo rozložení rovnoměrné. Špatně reaguje na ostré změny křivosti
- *založený na změnách křivosti* – vytvoří rozložení bodů závislé na průměrné křivosti dané oblasti. Špatně reaguje na různé velikosti oblasti.
- *spojení předchozích dvou algoritmů* – postihuje oba výše popsání problémy

Zároveň byl vytvořen algoritmus rozhodující na základě křivosti a velikosti oblastí, který z výše uvedených algoritmů se má použít.

Navržené algoritmy byly testovány na šesti ukázkových plochách různé složitosti (viz Obr. 3) a výsledky ukázaly, že vzorkování daných ploch bylo nejlépe provedeno pomocí genetických algoritmů. Nevýhodou však je, že výpočet těchto řešení trvá okolo 6000 s, zatímco užitím ostatních algoritmů do 60 s.

Závěry:

Výsledky studie prokázaly na provedených simulacích robustnost řešení. Použití genetických algoritmů se prokázalo jako velmi užitečné, především u povrchů s velkou složitostí, kde je jinak velmi obtížné najít vhodný způsob vzorkování. Z důvodu zaměření spíše na základy tohoto výzkumu není řešen směr dotyku sondy v zakřivených plochách. Jak je zmíněno v článku [4], normála v místě dotyku je odvozena z CAD modelu a tudíž ve skutečném místě dotyku může být jiná a tím zkreslovat výsledky. Využití genetických algoritmů by mohlo být přínosné pro vlastní práci při generování pozic měření. Otázkou zůstává, jaká by byla v konkrétním případě časová náročnost, pokud zde dosahuje řádu tisíců vteřin.



Obr. 3 Plochy použité pro testování vzorkovacích algoritmů [5]

3.2 Automatizace hledání pozic u laserových skenerů

3.2.1 PRIETO, F., et al.

CAD-based range sensor placement for optimum 3D data acquisition. *In 3-D Digital Imaging and Modeling*, 1999. : Proceedings. Second International Conference on. Ottawa, Ont., Canada, 1999. s. 128-137.

Autoři ve své studii prezentují metodu určení optimálních pozic měření laserovým skenerem na základě CAD dat. Cílem je nalezení takových pozic, že bude naskenován celý povrch součásti s co nejmenším počtem pozic. V uvedené metodě je k pohybu laserového skeneru využito CMM.

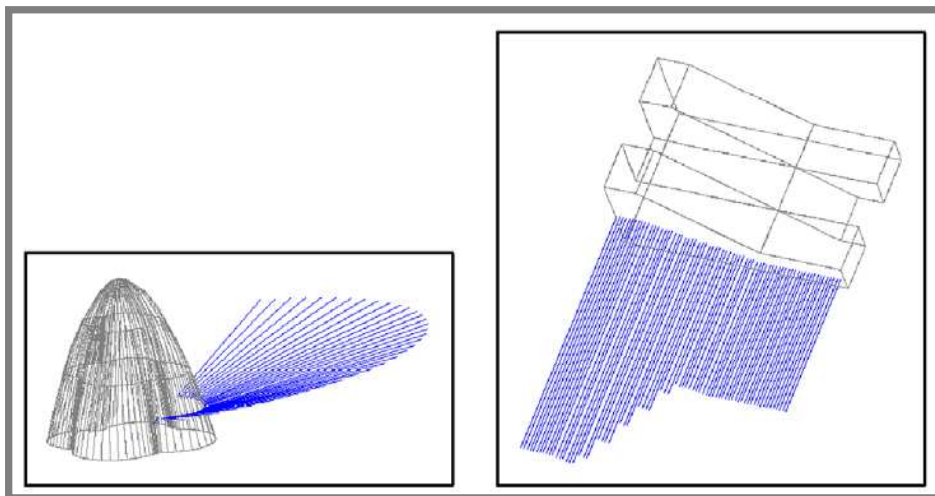
Výsledky:

Metoda je založena na poznatku, že daný skener dává nejlepší výsledky při vzdálenosti d 170 až 240 mm od objektu a úhlech sklonu laserové hlavy α -35 až 35° a β -15 až 15°. Na základě vstupních CAD dat (ve formátu IGES) je vygenerován voxelový model. CAD model reprezentovaný NURBS křivkami je pak základem pro generování promítnutých pohledů na modelu a následně samotných pozic skeneru, v ideálním případě kolmých k povrchu (viz Obr. 4). Metoda definuje každou skenovací polohu pomocí sedmi parametrů: $x^i = \{x, y, z, \phi, \theta, \psi, \gamma\}^i$. Parametry $\{x, y, z\}$ definují pozici kamery v souřadném systému součásti. Parametry $\{\phi, \theta, \psi\}$ definují natočení laserového paprsku v prostoru a poslední parametr γ definuje úhel nastavitelného laserového paprsku. Matice X pak zahrnuje sadu pozic $X =$

$\{x^1 x^2 \dots x^i \dots x^n\}$ pro naskenování jedné plochy. Díky využití voxelového modelu je navíc zajištěno, že nedojde ke kolizím mezi skenerem a objektem a k okluzi. V případě okluzy jsou nalezeny jiné vhodné pozice, které už nemusí být kolmé, ale jsou v ideálním rozsahu úhlů. Jakmile jsou nalezeny všechny potřebné pozice, je vypočítána odhadovaná přesnost skenovaných dat. Ta je u daného skeneru funkcí vzdálenosti d a úhlů sklonu laserové hlavy α a β . Pokud je přesnost dostatečná, může proběhnout měření. Studie prokazuje, že s použitou strategií byla přesnost skenování větší než bez použití prezentované strategie. Přesně vyčísleno, byla u skenování s navrženou strategií naměřena odchylka 0,048 mm a bez použité strategie 0,073 mm, tedy zlepšení o 25 μm , což je pro inspekční úlohu značné zlepšení.

Závěry:

Představená metoda ukazuje, že automatizované hledání optimálních pozic přináší kromě předpokládaného zrychlení skenování také jeho zpřesnění. Přínosné je představení způsobu parametrizace pozic skeneru i modelu pro výpočet okluzních pozic. Nevýhodou metody je to, že hledá optimální pozice pro každou plochu odděleně. Pro celé těleso se musí daný proces provést pro všechny plochy a není tudíž plně automatický. Není také uvedeno, jakým způsobem dojde k rozdělení jednotlivých ploch na menší celky, které skener obsáhne svým objemem. Také není uvedeno, co se stane, pokud pro některé plochy nebudou splněny optimální hodnoty parametrů, zda plocha bude naskenována s nižší přesností nebo nebude naskenována vůbec.



Obr. 4 Vygenerované pohledy laserového skeneru [6]

3.2.2 PRIETO, F., et al.

Inspection of 3D parts using high accuracy range data. In Proc. SPIE 3966, 82 : *Machine Vision Applications in Industrial Inspection VIII*. San Jose, CA, USA, 2000.

Jedná se o další rozvinutí předchozí studie. Rozšíření spočívá v doplnění předchozího o model popisující nepřesnosti měření (model šumu naměřených bodů) a vytvoření kompletního procesu inspekce.

Výsledky:

Navržený inspekční proces zahrnuje tři fáze: registraci dat, segmentaci a definici tolerování geometrie.

Registrace dat je řešena již klasickým ICP (Iterative Closest Point) algoritmem, který navrhl Besl a McKay [8]. Tento algoritmus hledá ideální transformaci tak, aby minimalizoval vzdálenosti mezi korespondujícími body. Pro zvýšení robustnosti transformace je ICP algoritmus spojen s metodou náhodného vzorkování a LMS (Least Median of Squares).

Při segmentaci je mrak bodů rozdělen do menších oblastí (jednotlivých ploch) na základě vstupních CAD dat.

Geometrické tolerování je rozděleno do klasických kategorií – tolerance tvaru, polohy a orientace.

Pro výpočet odchylek tvaru jsou vytvořena toleranční pole paralelní s NURBS plochami vstupního CAD modelu a pro měřený povrch platí, že je v zadaných tolerancích, pokud splňuje:

$$t_m \leq t_s \quad (2)$$

kde t_m je změřená vzdálenost, t_s je navržená tolerance.

Pro toleranci orientace je zaveden požadavek, že tolerovaný povrch splňuje specifikaci, pokud:

$$t_m = |d_2 - d_1| \leq t_s \quad (3)$$

kde vzdálenost d_1 je vzdálenost bodu p_1 od NURBS povrchu tak, aby 2,5% všech bodů daného povrchu splňovalo podmínku $d_i \leq d_1$ a vzdálenost d_2 je vzdálenost bodu p_2 od NURBS povrchu tak, aby 2,5% všech bodů daného povrchu splňovalo podmínku $d_i \geq d_2$.

Tolerance polohy je definována paralelními rovinami, hranolem nebo válcem uvnitř nějž se musí měřený povrch nacházet. Toleranční pole je umístěno ve vztahu k určitému referenčnímu elementu (nebo více elementům). Splněn tedy musí být následující vztah:

$$t_{1s} \leq t_{1m} < t_{2m} \leq t_{2s} \quad (4)$$

kde t_{1s} a t_{2s} jsou vzdálenosti od povrchů, které definují zónu tolerance vzhledem k navržené referenci a t_{1m} a t_{2m} jsou vzdálenosti od povrchů, které definují zónu tolerance změřenou ke skutečné referenci.

Model šumu je stanoven na základě kvality pozic měření. Minimálních hodnot nabývá v případě ideálních podmínek ($d = 170$ mm, $\alpha = 0^\circ$, $\beta = 0^\circ$), maximálních v extrémních podmínkách ($d = 240$ mm, $\alpha = 35^\circ$, $\beta = 15^\circ$). Výsledné hodnoty, které jsou výstupem inspekce, tak obsahují vedle hodnot naměřených tolerancí také informaci o spolehlivosti daného výsledku.

Závěry:

Představený model šumu je výhodný jako vodítko při posouzení výsledků inspekce, kde není pouze informace o splnění či nesplnění specifikací, ale také s jakou spolehlivostí je tento závěr stanoven. Představeny jsou metody pro kontrolu zadaných tolerancí, systém však neobsahuje nebo minimálně nepředstavuje řešení pro grafické zobrazení těchto tolerancí a znázornění případných naměřených odchylek.

3.2.3 PRIETO, F., et al.

An Automated Inspection System. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2002, Volume 19, Issue 12, s. 917-925.

Další rozšíření předchozích dvou studií je uvedeno v následující práci stejných autorů, kde je představen kompletní inspekční systém pro kontrolu rozměrových a geometrických tolerancí. Kromě podrobného popisu, jakým způsobem probíhá kontrola rozměrových, úhlových a geometrických tolerancí, obsahuje studie navíc porovnání výsledků z měření stejného tělesa pomocí CMM, Biris range skeneru a uvedeného laserového skeneru.

Výsledky:

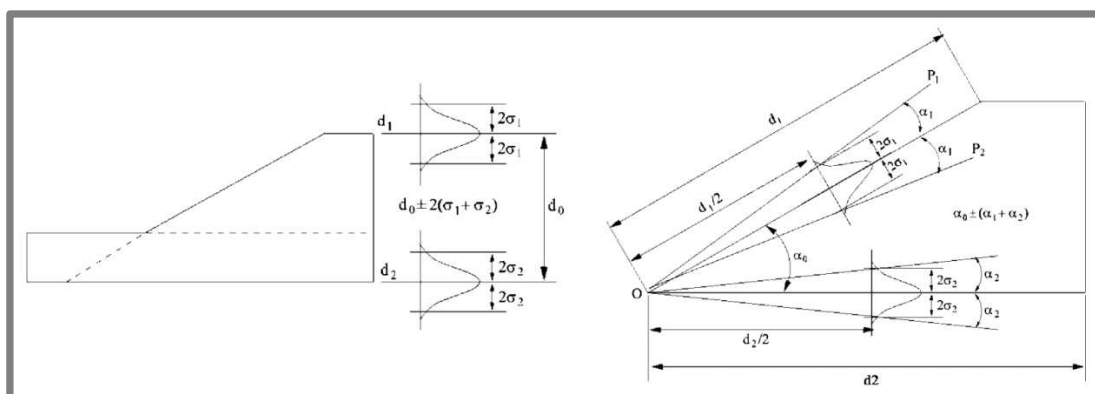
Kontrola rozměrových a úhlových tolerancí v uvedené studii probíhá následujícím způsobem. Naměřené body příslušící ke dvěma plochám, mezi nimiž má být měřena vzdálenost nebo úhel, vykazují Gaussovo rozložení. Změřený a vypočítaný rozměr s tolerancí je tedy v podobě:

$$d_0 \pm 2(\sigma_1 + \sigma_2) \quad (5)$$

V případě určení naměřeného úhlu je výpočet obdobný:

$$\alpha_0 \pm (\alpha_1 + \alpha_2) \quad (6)$$

Jednotlivé složky předchozích rovnic jsou patrné z Obr. 5. Kromě rozměrových a úhlových tolerancí jsou uvedeny postupy pro určení geometrických tolerancí (tvaru, polohy a orientace), postupy vycházejí z předchozího článku.



Obr. 5 Rozměrové a úhlové tolerance [9]

Systém vypočítané tolerance umožňuje zobrazit v barevné mapě odchylek. Lze nastavit minimální a maximální tolerance, systém pak vyhodnotí, zda je daná plocha v pořádku nebo ne. Zvolit lze také prahovou hodnotu, za kterou budou body odlišeny od vyhovujících odlišnou barvou. Dalším způsobem zobrazení je liniové zobrazení, kdy jsou u naměřených bodů zobrazeny úsečky k nejbližším bodům na příslušné NURBS ploše.

Pro ověření uvedených postupů bylo provedeno testovací měření, kde byly u zvoleného tělesa měřeny tyto tolerance: rozměrová tolerance mezi dvěma plochami, tolerance rovinnosti, kolmosti, odchylky úhlu a tolerance profilu. Měření provedené pomocí CMM s udávanou přesností $5\mu\text{m}$ bylo vzato jako referenční. Další dvě měření byla provedena pomocí Biris range skeneru a pomocí laserového skeneru z popisované studie. Výsledky jasně ukazují jako nejpreciznější měření pomocí CMM (naměřené odchylky do $40\mu\text{m}$). Následuje laserový skener s naměřenými odchylkami do $180\mu\text{m}$ a poslední je Biris range skener s odchylkami do $300\mu\text{m}$.

Závěry:

V porovnání se současnou přesností optických systémů je patrné, že za dobu 10 let, která od uvedených studií uplynula, došlo ke zvýšení přesnosti těchto systémů. Pravdou zůstává, že CMM stále dosahuje nejvyšších přesností. Ze studie plyne ale další zřejmá výhoda optických systémů, a to je množství bodů, ze kterých se výsledky vyhodnocují. Těchto bodů je minimálně o 2 řády více než u CMM a mohou tak odhalit i nedostatky, které CMM neodhalí.

3.2.4 MARTINS, F. A. R., GARCÍA-BERMEJO, J. G., CASANOVA, E. Z., PERÁN GONZÁLEZ, J. R.

Automated 3D surface scanning based on CAD model. *Mechatronics* [online]. Boca Raton: Taylor, 2006 [cit. 2012-05-30]. DOI: 10.1016/j.mechatronics.2005.01.004. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0957415805000371>

Cílem autorů článku je automatizace měření pomocí laserového skeneru s pohybem zajištěným pomocí CMM. Hlavní motivací autorů pro automatizaci je skutečnost, že při ručním měření laserovým skenerem se může neodborným výběrem pozic pro skenování snižovat přesnost takového měření, která už tak je nižší oproti

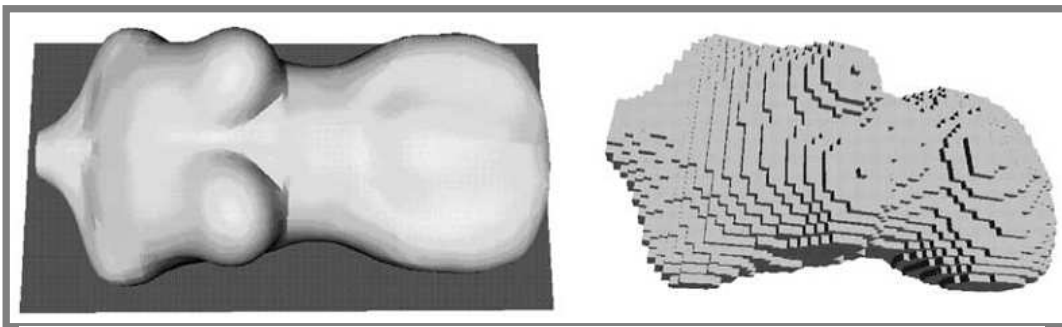
CMM. Zároveň si uvědomují výhodu měření laserovým skenerem z důvodu získání velkého množství dat, pokrytí kompletního povrchu součásti a lepší využitelnosti pro komplexní volné povrchy objektů.

Výsledky:

Off-line fáze zahrnuje dva procesy. Jsou jimi výpočet sady měřících pozic a výpočet cesty mezi těmito pozicemi tak, aby byl zajištěn dostatečný překryv jednotlivých skenů. Poslední fáze již probíhá on-line a jedná se o samotné měření.

Na rozdíl od jiných metod pro výpočet optimálních měřících pozic použitých v dalších studiích, v uvedené studii autoři prezentují metodu využívající voxelového modelu měřeného objektu. Tento voxelový model je použit jednak pro výpočet pozic, ale zároveň také pro kontrolu kolizí ve fázi výpočtu přejezdových drah. Kromě voxelového modelu je použit plošný model objektu ve formě STL souboru. Postup pro výpočet voxelového modelu je následující:

- Definování kvádrů, který obklopuje plošný model (pracovní objem)
- Rozdělení pracovního objemu na voxely; nastavení jejich stavu na *Prázdný*
- Asociace všech trojúhelníků STL sítě s korespondujícími voxely
- Definování *Povrchových voxelů* (ty, které jsou asociovány s trojúhelníky sítě)
- Definování *Neznámých/Vnitřních voxelů*
- Výpočet plošných normál u všech *Povrchových voxelů*



Obr. 6 CAD model a voxelový model testovacího objektu [10]

Pro výpočet pozic je následně každému povrchovému voxelu přiřazen jeden povrchový bod a hledá se takové řešení, aby byly měřením pokryty všechny povrchové body. Zároveň musí být splněny dvě podmínky – povrchový bod musí být *viditelný a dostupný*.

Závěry:

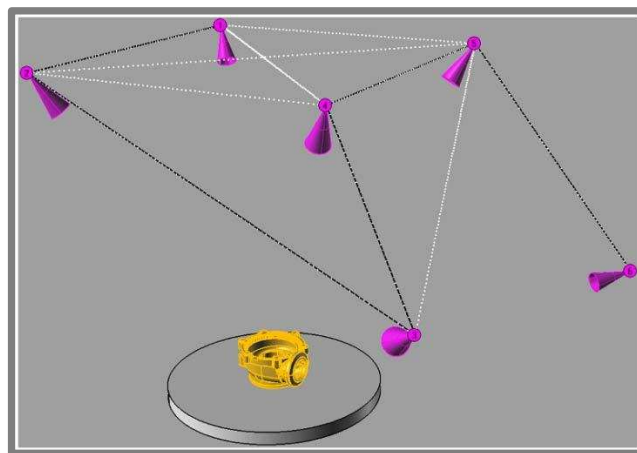
Otázkou je, zda by bylo možné použít voxelový model i v případě např. plechových dílů, kde jsou stěny velmi tenké a mohl by nastat problém ve výpočtu povrchových voxelů. Pravděpodobně by muselo dojít k rozšíření o velikostně závislé generování voxelů (ve velkých objemech velké voxely a např. u plechových částí malé voxely). Výhodu této metody vidím ve dvojitě využití voxelového modelu – pro generování pozic a pro kontrolu kolizí při pozicování a generaci přejezdových drah.

3.3 Automatizace hledání pozic u skenerů s proužkovou projekcí

3.3.1 GERMANI, M.; MENGONI, M.; RAFFAELI, R.

Automation of 3D View Acquisition for Geometric Tolerances Verification. *In 2009 IEEE 12th International Conference on Computer Vision Workshops : ICCV Workshops*. 2009. s. 1710-1717.

System, který představil tento kolektiv autorů, je nejbližší zaměření této práce. Jedná se o kompletní systém propojující CAD a inspekční software v jeden nástroj. Ten by měl umožnit konstruktérům předepsat na navrženém CAD modelu požadované tolerance, připravit a odsimulovat proces měření, provést samotné měření a následně analyzovat jeho výsledky.



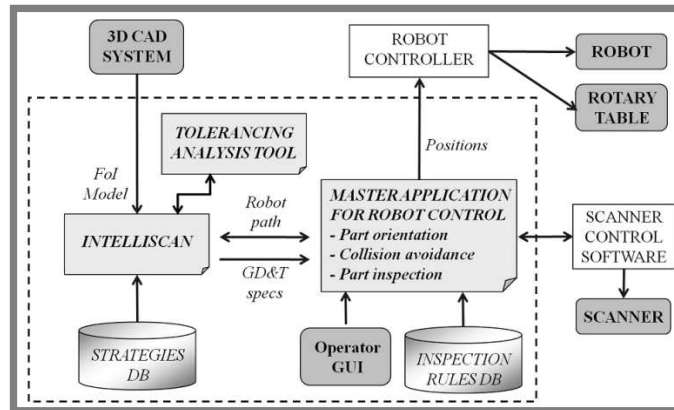
Obr. 7 Graf pozic a cest skeneru [11]

Výsledky:

Měření probíhá pomocí skeneru s proužkovou projekcí a průmyslového robota se 6 stupni volnosti. System na základě CAD modelu automaticky počítá ideální pozice skeneru pro měření, takže proces je kompletně automatizovaný (viz Obr. 7). Prezentovaný software byl vytvořen jako modul do prostředí programu Rhinoceros 4.0. Struktura celého systému je na Obr. 8.

Přístupy, které byly v práci použity pro generování optimálních měřících pozic, jsou následující:

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



Obr. 8 Struktura inspekčního systému [11]

Výsledky práce byly ověřeny na několika příkladech, z nichž dva jsou prezentovány. Cílem bylo ověřit algoritmy pro plánování pozic měření a efektivitu celé aplikace. Navržené algoritmy jsou založeny na kombinaci povrchových normál a map viditelnosti získaných z CAD dat. U uvedených příkladů bylo provedeno měření klasickým ručním způsobem a následně navrženou metodou. U prezentovaných ukázkových měření navrženým systémem došlo k úspoře použitých pozic měření (o přibližně 30 až 40% méně) a k úspoře času oproti skenování tradičním způsobem o 40 až 50 %.

Závěry:

Navržený systém na provedených příkladech prokázal, že jeho využitím dojde ke zrychlení celého procesu inspekce. Implementace navrženého systému do programu Rhinoceros je možné považovat za výhodu (univerzálnost, možnost použít grafické knihovny programu), zároveň však oproti komerčním inspekčním systémům postrádá robustnost. Autoři v závěru práce sami přiznávají, že ve volbě optimálních pozic pro skenování je stále důležitý lidský prvek.

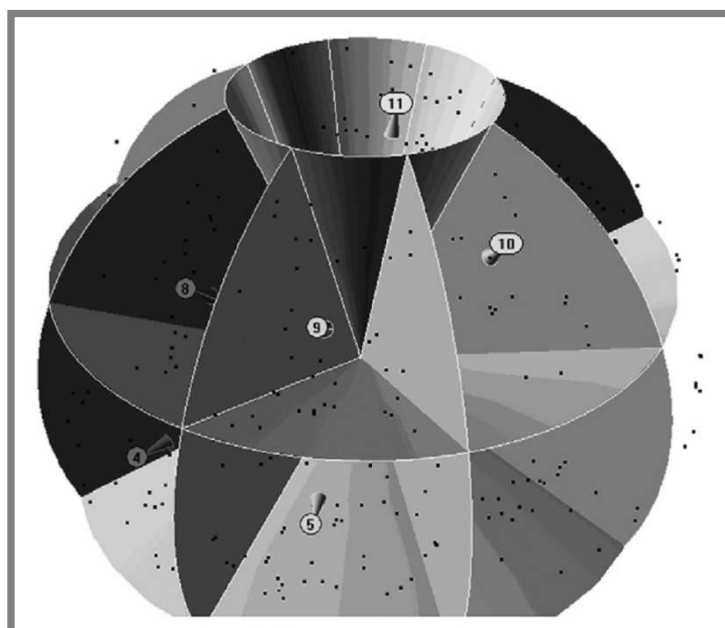
3.3.2 GERMANI, M., et al.

CAD-based environment to bridge the gap between product design and tolerance control. *Precision Engineering*. January 2010, Volume 34, Issue 1, s. 7-15.

Uvedená publikace dále rozvíjí předchozí práci a zaměřuje se na podrobnější popis získání optimálních pozic měření a to u objektů, kde je možné použít přístup skenování z obklopujícího kulového prostoru, tak objektů, které jsou plošného tvaru. Zároveň se velkou částí zaměřuje na proces kontroly předepsaných tolerancí.

Výsledky:

Pro výpočet optimálních pozic používá dvě strategie, podle poměru objemu skenované součásti a jejího protažení. U objektů, které přibližně zaujímají prostor zorného pole, je použita strategie skenování přes kulový prostor. Kulový prostor kolem skenovaného objektu, kde střed je ve středu objektu, je rozdělen na sektory a tím zůstávají u jednotlivých povrchů už jen dva stupně volnosti (viz Obr. 9). Druhá strategie se využívá u objektů s velkými kvazi planárními povrchy (např. trup lodi, plechové díly). U nich je jejich povrch rozdělen na menší překrývající se oblasti tak, aby byl překryv dostatečný pro následný proces registrace.



Obr. 9 Automatické nalezení vhodných pozic pro měření [12]

U představeného systému je velká pozornost zaměřena na proces kontroly předepsaných tolerancí. Tento proces je rozdělen na následující fáze:

- *specifikace a identifikace tolerancí* – GT tolerance jsou předepsány v konkrétním CAD modelu (FoI CAD model = Full of Information CAD model) a jsou uchovány v jasné struktuře obsahující identifikační číslo, kategorii (tvar, orientace, poloha), typ (rovinnost, rovnoběžnost, atd.), hodnotu a referenční roviny.
- *plánování a simulace ověřovacího procesu* – údaje z CAD modelu i z předepsaných kontrolovaných tolerancí jsou použity pro výpočet optimálních pozic měření
- *řízení inspekčního systému* – výstupem předchozího kroku je sada prostorových pozic pro měření, které jsou převedeny do formátu nutného pro řízení robota
- *předběžná best-fit registrace* – proces, během kterého jsou na CAD data registrována naskenovaná data
- *extrakce tolerovaných prvků a segmentace mraku bodů* – z CAD modelu jsou extrahovány GT informace pro inspekci tolerancí. Zároveň jsou naskenovaná data rozdělena do oblastí, které korespondují s tolerovanými oblastmi.
- *virtuální inspekce* – samotná inspekce, tedy výpočet tolerančních zón a porovnání, zda splňují zadané specifikace.

Navržené řešení autoři testovali za použití skeneru COMET, pracujícího na principu promítání světelného vzoru. Dále byl použit robot se 6 stupni volnosti a rotační stůl. Na 4 různě složitých objektech bylo provedeno testovací měření a oproti měření klasickým způsobem došlo k úspoře času o 25 až 45 %.

Závěry:

Navržené řešení automatizace hledání optimálních pozic je na vysoké úrovni. V návrhu pozic bere v úvahu také kontrolu tolerancí a rozvíjí tak dále systémy zaměřující se čistě na digitalizaci. Stále je však nutný zásah uživatele, například pro volbu skenovací strategie (kulová, plochá). Uvedené strategie navíc plným způsobem nepostihují celou problematiku. V mnoha případech nestačí pohledy skeneru směřující do středu kulového prostoru, i když jsou z různých pozic. Článek žádným podrobnějším způsobem nepředstavuje algoritmy pro nalézání optimálních pozic.

3.3.3 RAFFAELI, R.; MENGONI, M.; GERMANI, M.; MANDORLI, F.

Off-line view planning for the inspection of mechanical parts. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJDeM)* [online]. - [cit. 2012-05-27]. ISSN 1955-2513. DOI: 10.1007/s12008-012-0160-1. Dostupné z: <http://www.springerlink.com/index/10.1007/s12008-012-0160-1>

Článek opět navazuje na předchozí studie. Rozvíjí dále navržený systém a zaměřuje se na optimalizaci hledání pozic pro skenování. Oproti předchozí studii, kde byly použity dvě strategie skenování, v tomto případě autoři představují pět strategií. Strategie jsou rozlišeny podle toho, jaký typ dílu je měřen a co je na něm měřeno:

- *standardní GD&T inspekce* – vyžaduje kompletní pokrytí prvků, kde jsou tolerance měřeny nebo kde se nacházejí referenční roviny
- *ostříhy a hrany* – používá se pro plechové díly, kde je třeba zajistit kolmé pohledy na tato místa pro přesné určení hran
- *velké plošné díly* – díly s plochami s malou křivostí a s velkým množstvím NURBS ploch (např. karoserie aut, trupy lodí). Cílem měření je analýza křivosti těchto ploch.
- *kompletní tvar dílu* – získání kompletního tvaru dílu je důležité například u plastových nebo plechových dílů, kde dochází k plastickým deformacím vlivem tepla nebo smrštění.
- *poloha konkrétních bodů* – strategie pro přesné určení poloh bodů definovaných z konstrukce. Používané pro ověření nestavitelnosti.

Proces hledání optimálních pozic pracuje iteračně. Vypočte optimální pozice a v další iteraci spojí v simulaci nenaskenované body s výchozím stavem a pokračuje v optimalizaci poloh dalším iteračním krokem.

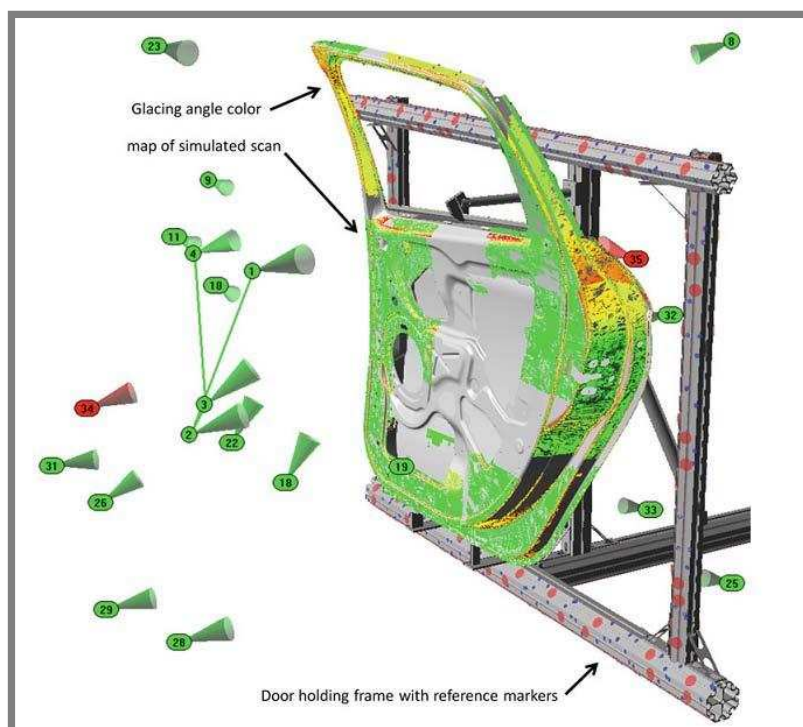
K registraci skenovaných dat je použita buď metoda RPM (Reference Point Matching), pokud jsou referenční body použity, nebo ICP (Iterative Closest Point) u dílů, kde referenční body použity nejsou. Pro ICP je však nutné mít dostatečně velké překrývající se oblasti s dostatečnou křivostí.

Výsledky:

V práci jsou provedeny dva typy testovacích měření. V prvním je skenován jednoduchý odlitek, na němž jsou předepsány tolerance (válcovitost, rovnoběžnost, kolmost, tolerance pozice). Systém určil 8 pozic pro jeho skenování. Ručně byly přidány další dvě pozice, aby se překlenula příliš velká vzdálenost mezi některými pozicemi. Skenování proběhlo pomocí průmyslového robota a laserového skeneru

Minolta Range 7. Deset mraků bodů bylo následně automaticky pomocí ICP algoritmu spojeno dohromady v softwaru RapidForm.

Ve druhém typu testovacího měření byly měřeny dveře (viz Obr. 10) a kapota osobního automobilu, tedy velmi komplexní a složité díly. Na těchto dílech byly určeny body pro kontrolu (od 44 do 107 bodů) a navrženou strategií byly tyto díly měřeny. Cílem bylo otestovat, schopnost systému určit polohy těchto bodů pro jejich inspekci. Úspěšnost se pohybuje od 62 do 91 %. Důvodem je velká složitost zvolených dílů a také použití rámu s referenčními body, kvůli kterému je omezen rozsah použitelných poloh.



Obr. 10 Vypočítané měřicí pozice a simulace měření [13]

Závěry:

U dosažených výsledků je důležité, že experimentální měření potvrdilo virtuální analýzu. Relativně nízká úspěšnost v měření je tedy způsobena jinými důvody než špatnými algoritmy. Tímto důvodem je použití rámu, který drží měřené objekty a zároveň obsahuje referenční body pro spojení záběrů. Použitím vhodnější konstrukce rámu nebo umístěním referenčních bodů přímo na měřený objekt by se docílilo lepších výsledků. Velkou výhodou představeného systému je rozhodně možnost virtuálně otestovat měření z vypočítaných pozic. Tím se dramaticky snižuje čas pro nalezení optimálního řešení.

3.3.4 SHI, Q., XI, N., SHENG, W., CHEN, Y.

Development of dynamic inspection methods for dimensional measurement of automotive body parts. In: *2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation:ICRA 2006* [online]. 2006 [cit. 2012-05-31]. ISBN 978-078039506-0.

Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1641730&userType=inst>

Studie představuje systém plánování pozic pro automatizované měření skenerem s proužkovou projekcí. Jedná se o systém s uzavřeným okruhem – kromě CAD dat použitých pro prvotní předepsání pozic je využívána aktuální informace z kvality naskenovaných dat a na základě ní jsou případně doplněny další měřicí pozice.

Výsledky:

Systém se zaměřuje, oproti mnohým jiným, především na kvalitu získaných dat. U systémů nasazených k průmyslovému využití se usiluje především o rychlost získání dat a tím pádem o co nejnižší možný počet měřících pozic, z nichž by došlo k dostatečnému pokrytí měřeného dílu. U představeného systému je cílem získání kvalitních (přesných, hladkých a kompletních) dat. Chybějící místa ve skenovaných datech jsou často způsobena stíny a odlesky světla (viz Obr. 11). Tomuto problému se daná studie věnuje a řešení přináší ve zpětnovazebném modelu. Informace z naskenovaného dílu se přenášejí zpět do procesu měření a na jejich základě jsou vypočítány pozice nové.

Studie představuje matematický model uzavřeného dynamického inspekčního procesu a sestává z těchto jednotlivých dílčích modelů:

- Model systémových komponent – CAD model, model skeneru, parametry skeneru a zpětnovazebné informace
 - CAD model – reprezentován trojúhelníkovou sítí
 - model skeneru – je popsán rovnicí: $h = (L \cdot S)/(d + L \cdot S)$
 - parametry skeneru – zahrnují zorné pole, vzdálenost skeneru, rozlišení obrazu, zaostřovací vzdálenost (její rozsah) a viditelnost skeneru (danou třemi vektory – projekční vektor, vektor kamery a normálový vektor plochy)
 - mapa chyb (zpětnovazebná informace) – zahrnuje tři mapy (mapa stínů, mapa odlesků, mapa přesnosti). Je zavedena účelová funkce, která po dosažení určité prahové hodnoty zastaví proces přidávání dalších pozic
- Model dynamického měřícího procesu – model na základě předchozích definic popisuje uzavřený systém na plánování pozic pomocí rovnic:

$$V \doteq f_0(M, TC) \cup g_k(I) \quad (7)$$

$$P_C \doteq \Gamma(V) \quad (8)$$

$$E = \Delta(M, P_C) \quad (9)$$

kde V a P_C jsou akumulované výsledky iterací, M značí CAD model, TC jsou parametry skeneru, V jsou měřicí pozice a P_C je mrak bodů.

Výpočet náhradních pozic při detekci odrazů probíhá na základě uvažování Phongova osvětlovacího modelu. Z Fresnelova zákona vyplývá, že směr odrazu nejvíce záleží na dopadajícím paprsku. Změna úhlu pohledu by tedy měla odstranit

tento problém. Velikost změny by měla být větší než úhel θ , což je úhel mezi směrem dopadu a pohledem kamery.

Navržený systém byl implementován pro použití s robotem PUMA 560 k ukázkovému měření sloupku automobilu.



Obr. 11 Ukázka odlesku na měřeném povrchu [14]

Závěry:

Autoři zmiňují, že nadbytečná data z přidávaných záběrů přispívají ke zvýšení kvality naskenovaného mraku bodů. Přílišné překryvy však mohou kvalitu spíše zhoršovat. Zlepšení nastává v případě, kdy jsou data nepřesně vypočítána a nový záběr má vyšší kvalitu a zprůměrováním s předchozím se přesnost zvýší.

Systém řeší problematiku odlesků až zpětně, poté, co provede měření. Tento postup může vést k nadbytečnému množství pozic, které by bylo možné přímým postupem redukovat. Studie v podstatě neřeší osvětlovací model, ale pouze na základě jednoduché úvahy o změně úhlu redukuje vliv odrazů. Ve studii je navržené řešení a výsledek konkrétního měření ukázán pouze na jednom obrázku, není zde žádný podrobnější příklad, ukázka měření a například porovnání s ručním stanovením pozic, časem potřebným pro výpočet atd.

3.3.5 SHI, Q., XI, N., SHENG, W.

Recursive measurement process for improving accuracy of dimensional inspection of automotive body parts. In: *2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation:ICRA'07* [online]. 2007 [cit. 2012-05-31]. ISBN 978-142440602-9. Dostupné z: <http://ascc.okstate.edu/paper/4209831.pdf>

Uvedená studie dále rozšiřuje předchozí práci stejných autorů. Do zpětnovazebního modelu přidává část hlídající možné nepřesně naměřené oblasti vznikající vlivem nízkého kontrastu. Práce se také zaměřuje na zpřesnění detekce hran promítaného vzoru.

Výsledky:

Ke zpřesnění detekce hran autoři využívají metodu promítání stejného vzoru jen s opačnou intenzitou (tam kde byly proužky černé, budou bílé a naopak). Tím se na každé hraně získají ze dvou sousedních pixelů, mezi nimiž leží skutečná hrana, 4

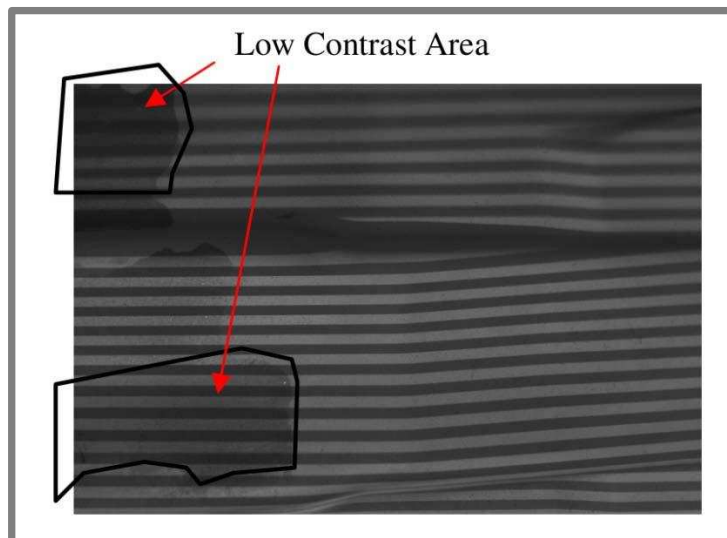
hodnoty intenzity světla, z nichž se se subpixelovou přesností interpolací vypočítá přesná poloha bodu na hraně.

Práce se dále zabývá problémem oblastí s nízkým kontrastem. V nich se zvyšuje nejistota určení správného pruhu (černý/bílý), protože vlivem šumu je poměr intenzit v méně kontrastních oblastech nižší.

Byla provedena testovací měření, která ukázala rozdíl chyb v měření kontrastních a málo kontrastních oblastí. U málo kontrastních oblastí je patrný nárůst chyby měření. Jako řešení je ve studii navrženo vícenásobné měření málo kontrastních oblastí. Výsledky po zprůměrování více měření stejné oblasti ukazují, že se celková chyba snížila. A to jak u málo kontrastních oblastí, tak u těch kontrastních.

Oproti předchozí studii je zpětnovazebný model rozšířen o část hlídající možné nepřesně naměřené oblasti. Tento model iteračním způsobem přidává další měřicí pozice tam, kde zůstávají nenaskenované oblasti (vlivem odrazů) nebo kde vlivem nízkého kontrastu není zaručena dostatečná přesnost měření. Iterační postup je určen prahovou hodnotou účelové funkce Q .

Na Obr. 12 je ukázka z měření automobilového sloupku, na němž bylo provedeno testovací měření. Jsou vyznačeny oblasti, u kterých bylo na základě algoritmu zhodnoceno, že je zde nízký kontrast. Desetinásobným opakováním tohoto záběru a jeho následným zprůměrováním bylo dosaženo zvýšení přesnosti. Směrodatná odchylka poklesla z hodnoty 0,19 na 0,09.



Obr. 12 Měření dílu s málo kontrastními oblastmi [15]

Závěry:

Pokud jsou málo kontrastní oblasti důsledkem pouze jinak světelně odrazivého/pohltivého materiálu, pak by pro jeho modelování v osvětlovacím modelu musel být dostupný model materiálů měřeného dílu.

Opakovaná měření by v praxi velmi zpomalovala celkové měření. Zvláště pokud autoři uvádějí, že na jednom místě bylo provedeno 10 měření a tato měření dohromady trvala 5 minut. Navíc je otázkou, jestli jsou pak tyto záběry skládány

dohromady i s celým mrakem bodů nebo až výsledný zprůměrovaný záběr. Pokud by platila první varianta, negativně by to ovlivnilo celý mrak bodů.

3.4 Redukce vlivu různé odrazivosti povrchu a odlesků světla

Jak již bylo zmíněno v předchozím textu, kvalita naskenovaných dat může být velmi ovlivněna jednak odlesky světla při skenování lesklých materiálů nebo také zhoršenou schopností naskenovat daný povrch z důvodu různé odrazivosti materiálu. Tyto negativní vlivy se některé studie snaží redukovat.

3.4.1 Redukce vlivu různé odrazivosti povrchů objektu

YAU, Shing-Tung a Song ZHANG. High dynamic range scanning technique. *Optical Engineering*. 2009-03-01, vol. 48, issue 3, s. 033604-. DOI: 10.1117/1.3099720. Dostupné z: <http://opticalengineering.spiedigitallibrary.org/article.aspx?doi=10.1117/1.3099720>

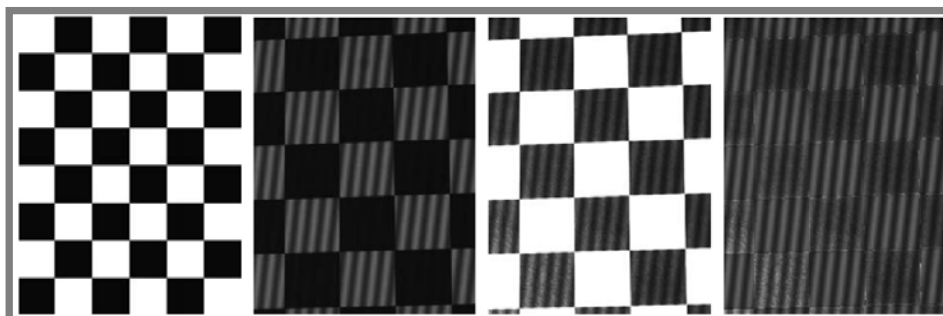
Některé dřívější studie uvádějí použití polarizačních filtrů, které zmírňují negativní efekty projevující se u lesklých povrchů. Filtry ale zároveň snižují intenzitu výstupního světla z projektoru a světla vstupujícího do kamery. Tím se snižuje schopnost měřit tmavší objekty.

Článek představuje metodu HDRS (High Dynamic Range Scanning = skenování s vysokým jasovým rozsahem).

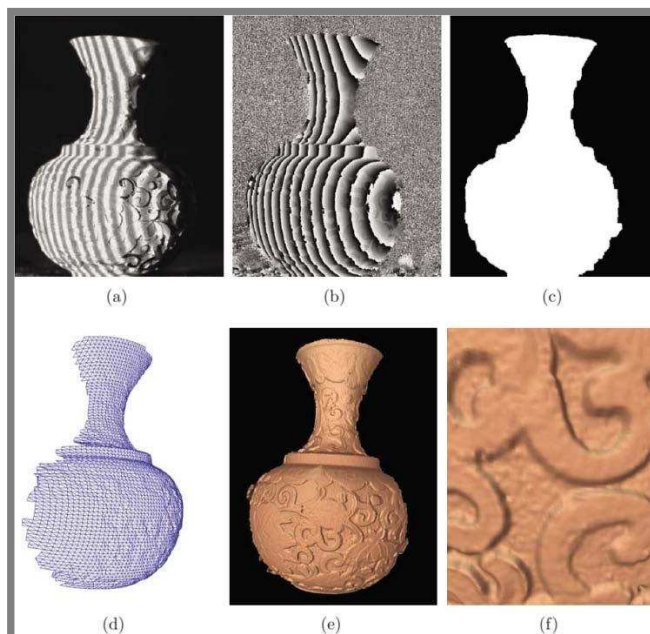
Výsledky:

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. Pro rekonstrukci prostorových souřadnic je použit algoritmus fázového posunu, s použitým fázovým posunem $2\pi/3$.

Navržená metoda skenování s více expozičními časy je demonstrována na skenování černobílé šachovnici, kde je patrné, že kombinací více expozičních časů je možné docílit záznamu povrchů s různou odrazivostí (viz Obr. 13). Dále jsou prezentovány výsledky ze skenování čínské vázy, která se také vyznačuje vysokým rozsahem odrazivosti povrchu. Ke skenování vázy je použito 23 různých expozičních časů. Výsledný rekonstruovaný tvar je alespoň z přiloženého obrazového materiálu velmi dobrý (viz Obr. 14).



Obr. 13 Šachovnice s promítnutým vzorem s různými expozičními časy a výsledným obrazem [16]



Obr. 14 Ukázka skenovaného objektu metodou HDRS [16]

Závěry:

V článku není uveden celkový čas při skenování vázy, u 23 expozičních časů se dá očekávat poměrně vysoký celkový čas, při kterém se může negativně projevit libovolný pohyb. Není uvedeno, zda je stanovení dostatečného počtu expozičních časů prováděno automaticky, nebo je musí stanovit uživatel (pravděpodobnější je druhá možnost). Chybí přesnější výsledky navržené metody. Není uvedeno, jaká je přesnost u naměřené vázy (například v porovnání s měřením s nástřikem zmatňujícího prášku).

Výhodou metody je to, že není nutné použít polarizační filtry a tím nedochází k úbytku intenzity vysílaného a přijímaného světla.

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*. IEEE Comput. Soc, 2000, s. 778-781. ISBN 0-7695-0750-6. DOI: 10.1109/ICPR.2000.905506. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=905506>

Práce řeší stejný problém, jako předchozí, ale používá mechanismus výpočtu radiačních map s vysokým jasovým rozsahem.

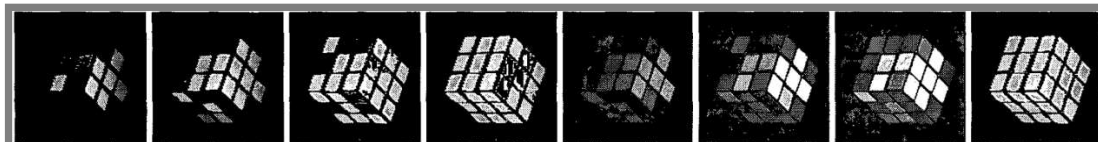
Výsledky:

Autoři článku řeší problém různé úrovně (a nelinearity) relativní odrazivosti povrchu při různé použité intenzitě světla (viz Obr. 15). Řešení našli v minimalizaci funkce, do které vstupují intenzita použitého světla, hodnota výsledného osvětlení pro každý pixel a neznámé funkce relativní odrazivosti. Výsledkem je pak možnost výpočtu relativní odrazivosti pro libovolný bod scény pomocí rovnice:

$$r_i = e^{h_1(g_{ij}) - h_2(l_j)} \quad (10)$$

Při použití tohoto přístupu jsou pak hodnoty relativní odrazivosti pro každý bod scény, při různých intenzitách světla, prakticky stejné (normalizovaná směrodatná odchylka je $4,22 \cdot 10^{-3}$).

Následným složením radiačních map z více snímků (jejich počet záleží na rozsahu odrazivosti materiálů na měřeném objektu) je získána radiační mapa s vysokým dynamickým rozsahem a z ní následně hloubková mapa (obraz), ze které je již možné získat prostorové informace o objektu.



Obr. 15 Obraz objektu s různou intenzitou osvětlení a různou radiační mapou [17]

Závěry:

V článku je opět uveden jako výsledek pouze obrazový materiál, z něhož sice vyplývá, že použitá metoda přináší zlepšení získaných dat měření, tento výsledek není ale nijak kvantifikován. Navržená metoda není experimentálně představena na žádném lesklém povrchu. Na objektech s různou odrazivostí povrchu však přináší zjevně dobré výsledky a její návrh je poměrně jednoduchý.

3.4.2 Redukce vlivu odlesků světla

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/ISSN 1063-6919. DOI: 10.1109/CVPR.2011.5995321. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5995321>

Práce nejprve analyzuje a rozčleňuje typy chyb, ke kterým dochází vlivem osvětlení scény a jednotlivých bodů při skenování pomocí strukturovaného světla. Následně pak navrhuje použití takových vzorů, které tyto chyby potlačují.

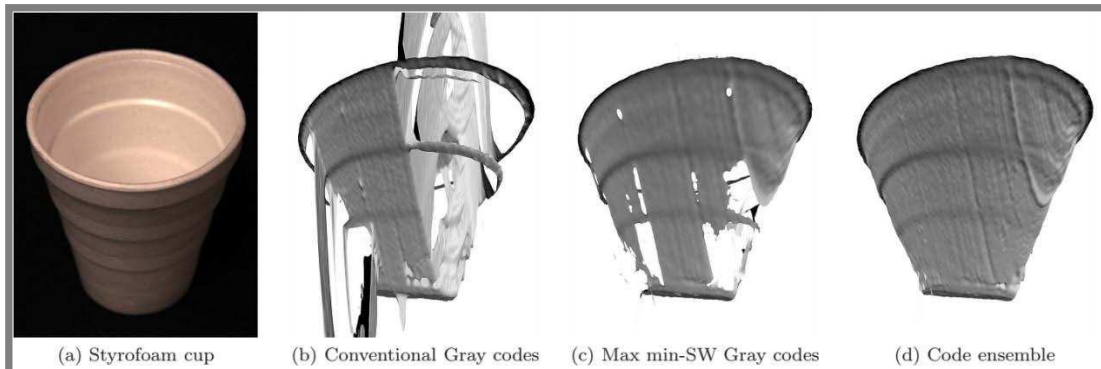
Výsledky:

Autoři rozdělují chyby na ty, způsobené efekty dlouhého rozsahu a ty, způsobené efekty krátkého rozsahu. V prvním případě jsou to chyby spojené s difuzí a vícenásobnými odrazy v rámci měřeného objektu. Ve druhém případě jsou to chyby spojené s podpovrchovým rozptýlením světla a rozostřením zdroje světla. Pro potlačení vlivů efektů dlouhého rozsahu by bylo třeba použít promítaný vzor s vysokými frekvencemi (s co nejužšími proužky) a naopak pro potlačení efektů krátkého rozsahu by bylo třeba promítaný vzor s nízkými frekvencemi (široké pruhy).

Na základě předchozího požadavku byly pro první případ vytvořeny vzory založené na logickém operátoru XOR, 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 druhý případ

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. Porovnáním hodnot výsledné hloubky z těchto čtyř přístupů je určena skutečná výsledná hloubka. V případě chybných pixelů (správná hloubka nemohla být určena žádnou kombinací předchozích vzorů) jsou osvětleny pouze tyto body scény. Tím se sníží celkové osvětlení scény a zabrání se tak také například vícenásobným odrazům světla.



Obr. 16 Ukázka použití navrženého kódování světelného vzoru [20]

Závěry:

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. Problém bude ve vyšším množství použitých snímků a tedy pravděpodobně delším skenovacím čase. Výsledné skenovací časy u testovacích objektů autoři neuvádějí.

Autoři ještě podrobněji popisují navrženou metodu ve své další práci [20], kde zároveň provádějí analýzu chyb jednotlivých vzorů. Zároveň poskytují celou řadu příkladů objektů, na nichž je navržená metoda testována, a výsledky vypadají velmi dobře. Metodu lze použít a rozšířit nejen na binární kódy, ale například i barevné kódy. Velkým přínosem je to, že autoři poskytují kódy pro navrženou metodu v Matlabu, takže je možné je použít a testovat.

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. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2011.11.021. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0143816612000978>

V této práci je použit podobný přístup jako v práci [16]. Pořadí se série stejných snímků s různou expozicí a sloučením těchto snímků je získán výsledný snímek s vysokým dynamickým rozsahem, kde je vysoký vztah mezi úrovní signálu a hladinou šumu (SNR – Signal-To-Noise ratio). Z tohoto snímku je získána informace o hloubce.

Výsledky:

Složení jednotlivých snímků získaných s různou expozicí probíhá za použití masky, která automaticky vybírá pixely s nejvyšší intenzitou (ale bez saturace) mezi pořizovanou sadou snímků. Stanovení vstupních parametrů skenování (počet snímků, rozsah expozic, intenzita projektoru) je provedeno pomocí pořizování a analyzování úvodního snímku s rovnoměrným osvětlením měřené scény. Výsledný počet pořizovaných snímků bude vždy $4N$, kde N je požadovaný počet skenů. To je z důvodu použití algoritmu s fázovým posunem o $\frac{\pi}{2} - \left(0, \frac{\pi}{2}, \pi, \frac{3\pi}{2}\right)$.

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.

Metoda je experimentálně ověřena na hliníkovém dílu (viz Obr. 17) a dále také na dvou kalibračních koulích, kde jsou otestovány dvě sady parametrů. U jedné se mění pouze čas závěrky kamer, u druhé i intenzita použitého světla z projektoru. Druhá varianta dává lepší výsledky a ukazuje tak zlepšení oproti běžněji používané (i v jiných systémech) první metodě.



Obr. 17 Měření objektu, snímek s vysokým dynamickým rozsahem a výsledná hloubková mapa [18]

Závěry:

Autoři uvádějí, že pro experimenty s hliníkovým dílem bylo použito celkem 144 snímků (72 pro každou kameru, byly použity 2 kamery) a celkový čas měření byl 30 s. To je neúnosné pro jakékoliv praktické měření. Navíc to vypadá, že byly pro každou kameru snímky pořizovány zvlášť, což by v běžných podmínkách nemělo být nutné a se synchronizovanou spouští by bylo možné pořizovat snímky synchronizovaně. Výhodou oproti práci [16] je automatické (nebo minimálně poloautomatické) stanovení parametrů pro různě odrazivé povrchy. Nevýhodou je složitost procedury a velmi dlouhý čas skenování.

4 ANALÝZA, INTERPRETACE A ZHODNOCENÍ POZNATKŮ ZÍSKANÝCH NA ZÁKLADĚ REŠERŠE

4

Metody automatizace hledání měřicích pozic se vyskytují u všech typů zařízení pro získání inspekčních dat – CMM, laserových skenerů i skenerů s proužkovou projekcí.

V případě CMM je automatizace zaměřena na registraci CAD dat s měřenými daty. Metodou, která je k tomuto určena je například metoda s odsazenými NURBS plochami popsaná v článku [3]. Především pro objekty s volnými povrchy je dále v případě automatizace měření pomocí CMM řešen proces vzorkování povrchů pro nalezení optimálního rozložení měřicích bodů. Práce [3] až [5] všechny uvažují algoritmy, které jsou závislé na křivosti ploch nebo velikosti podoblastí. Velice zajímavé řešení přináší práce [5], která jako jeden z algoritmů využívá genetické algoritmy a jejich použitím docílí nejlepších výsledků navzorkování (ovšem velmi pomalým způsobem).

U laserových skenerů se automatizace týká automatického hledání optimálních pozic pro měření a cest pro přesun mezi pozicemi. Do algoritmů pro hledání optimálních pozic jsou například ve studiích [6], [7] a [9] zahrnuty parametry pozice skeneru, v jejichž rozsahu podává nejpreciznější výsledky. Z toho tedy vyplývá, že automatizace hledání optimálních pozic přináší oproti manuálnímu měření nejen zrychlení, ale také zpřesnění. Studie, které hledají optimální pozice měření, k tomu nejčastěji využívají NURBS plochy nebo povrchovou trojúhelníkovou síť. Zároveň pak využívají voxelového objemového modelu pro zamezení kolizím mezi skenerem a měřeným dílem. Studie [10] využívá pro hledání pozic měření voxelový model, ale také povrchové normály odvozené z trojúhelníkové STL sítě.

Skenery se strukturovaným světlem a jejich automatizace je méně rozšířená než v případě laserových skenerů (alespoň podle množství dostupné literatury). Práce z této oblasti však řeší velmi podobné problémy jako v případě laserových skenerů. Důvodem je to, že oba typy pracují na podobných principech (triangulace), rozdíl je v tom, že laserové skenery nemají v mnoha případech stálou pozici, ale skenují průběžně při pohybu. Autoři, zabývající se touto problematikou, přistupují k řešenímu dvojím způsobem. Buď se snaží najít nejmenší možný počet pozic a záběrů, jimiž by došlo k naskenování celého povrchu v co nejkratším čase (příkladem jsou práce [11] až [13]) nebo hledají způsob jakým naskenovat povrch co nejkompletněji a v nejvyšší kvalitě (práce [14] a [15]). Stejně práce rozdělují způsoby automatizovaného měření ještě na další dva typy a to podle uzavřenosti či otevřenosti celého procesu inspekce. První práce reprezentují otevřenou smyčku – průběh je přímý, vstupem jsou CAD data a další parametry, výstupem měřicí pozice. Druhé práce zahrnují zpětnou vazbu – z kvality naměřených dat se v průběhu odvozují další měřicí pozice. Druhý způsob zvyšuje kvalitu naměřených dat, je však časově náročnější a problém vidím také v tom, že nové pozice nejsou dopředu odsimulovány a existuje zde riziko, že dojde ke kolizi mezi skenerem, robotem a měřeným dílem.

Kromě studií, které řeší automatizaci pomocí těchto tří způsobů samostatně, existují i práce, které využívají výhod měření jednotlivými metodami. Příkladem mohou být práce [21] a [22]. Oblasti, kde je vyžadována vysoká přesnost, případně oblasti, které jsou běžnými primitivy (roviny, válce, apod.) jsou měřeny pomocí CMM, oblasti především s volnými povrchy pak pomocí laserového skeneru.

Problémy způsobené odlesky a různou odrazivostí povrchu skenovaných dílů řeší řada prací, v tomto pojednání jsou zmíněny a popsány práce [16], [17], [18], [19] a [20]. Nejčastějším přístupem je pořízení většího množství stejných snímků s různou expoziční dobou (nebo různou intenzitou osvětlení projektořem) a složením těchto snímků vznikne snímek s vysokým dynamickým rozsahem, u něhož jsou potlačeny efekty saturace a nízkého osvětlení tmavých oblastí. Nevýhodou těchto metod je většinou vysoký skenovací čas (až 30 s!), při kterém jsou však výsledky výrazně lepší než při použití jednoho snímku. Toto řešení je v omezené míře využíváno i u dále navrženého řešení, protože systém ATOS, který bude využíván, umožňuje skenování s více expozičními časy.

Jak ukazuje například práce [15] (a jak řeší práce [16] - [20]), do měření zasahují negativním způsobem stíny, odlesky a různá odrazivost povrchu. Zahrnutí odlesků do matematického modelu pro automatické generování měřicích pozic však dosud není řešeno. Zmíněná práce uvažuje zjednodušený Phongův model a z Fresnelova zákona uvažuje úhel, o který se musí pohled změnit, aby byly odlesky eliminovány. Řeší tento problém ale až v on-line fázi měření. Stále tak chybí práce, která by zahrnovala model osvětlení a odrazů v off-line plánování pozic.

Práce [11] - [13] jsou nejbližší zamýšlenému řešení. Práce [13] se sice (mimo jiné) zaměřuje na skenování velkých plošných dílů, nepokrývá ale problém větších místních křivostí, kde je aproximace velkou plochou nedostatečná. Zároveň je v hlavních krocích uveden v simulaci snímání problém odlesků, ale jeho řešení není nijak dále zahrnuto (tato informace se zakládá na emailové komunikaci s autory práce). Řešení je vypracováno pro jednokamerový systém. Tato tři omezení se snažím ve své práci pokrýt.

5 VYMEZENÍ CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE A NÁVRH ZPŮSOBU JEJÍHO ŘEŠENÍ

Záměrem práce je zrychlit proces přípravy inspekčního měření především v sériové výrobě a kontrole prostřednictvím optického skeneru a průmyslového robota. Manuální příprava těchto pozic velmi časově náročná a podle složitosti dílu může trvat až několik hodin. Díky navrženému řešení se dá očekávat časová úspora v řádu desetinásobku.

Cílem práce je vytvoření softwaru, jehož vstupem bude CAD model měřeného dílu a výstupem seznam měřicích pozic robota, které bude možné použít pro automatické skenování daného dílu. Automatizované inspekční měření bude provedeno pomocí dvoukamerové skenovací hlavy umístěné na průmyslovém robotovi. Algoritmy pro generování pozic měření budou specializované pro ploché plechové díly s komplexnějším tvarem. Do fáze přípravy měřicích pozic a do jejich následné simulace budou zahrnuty kroky redukující vliv odlesků světla. Ve fázi simulace to bude zahrnutí složky lesklého odrazu Phongova osvětlovacího modelu.

Pro řešení práce lze stanovit tyto dílčí cíle:

- Návrh způsobu popisu CAD dat pro účely stanovování měřicích pozic
- Návrh způsobu vzorkování povrchu měřeného objektu pro definování povrchových normál
- Návrh způsobu segmentace měřeného dílu na oblasti pro generování jednotlivých pozic
- Příprava algoritmu pro výpočet měřicích pozic pro kompletní pokrytí povrchu měřeného objektu
- Způsob výpočtu map viditelnosti (pro určení viditelnosti bodů pod daným směrem)
- Návrh způsobu simulace navržených pozic a zjištění skutečné viditelnosti jednotlivých polygonů
- Způsob zahrnutí osvětlovacího modelu do výpočtu skutečné viditelnosti polygonů
- Stanovení iteračního postupu pro doplnění pozic, které doplní chybějící polygony
- Návrh modelu dostupnosti robota, kontroly kolizí a implementace modelu do iteračního postupu
- Experimentální ověření vytvořeného systému pomocí testovacích měření

Na základě experimentálních měření bude provedeno vyhodnocení navržené metodiky a případně budou provedeny potřebné úpravy.

Na základě provedené rešerše a jejího kritického zhodnocení bude provedena změna názvu disertační práce.

Nový název práce: Automatické generování pozic optického skeneru pro digitalizaci plechových dílů.

6 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÍ DISERTAČNÍ PRÁCE

K vývoji zamýšleného softwaru je využit software Rhinoceros. Rhinoceros je software určený k 3D modelování – plošnému i objemovému. Zároveň však nabízí pokročilé funkce pro práci s polygonálními sítěmi, nástroje pro renderování nebo nástroje pro tvorbu výkresové dokumentace. Software Rhinoceros byl zvolen i z toho důvodu, že je pro návrh obdobného automatizačního softwaru použit i v člancích [11] - [13].

Tým vývojářů softwaru Rhinoceros nabízí k dispozici Software Development Kit (SDK) založené na platformě .NET. SDK se jmenuje RhinoCommon a umožňuje multiplatformní (Windows, Mac) tvorbu plug-inů pro Rhinoceros v programovacích jazycích VB.NET, C# a Python.

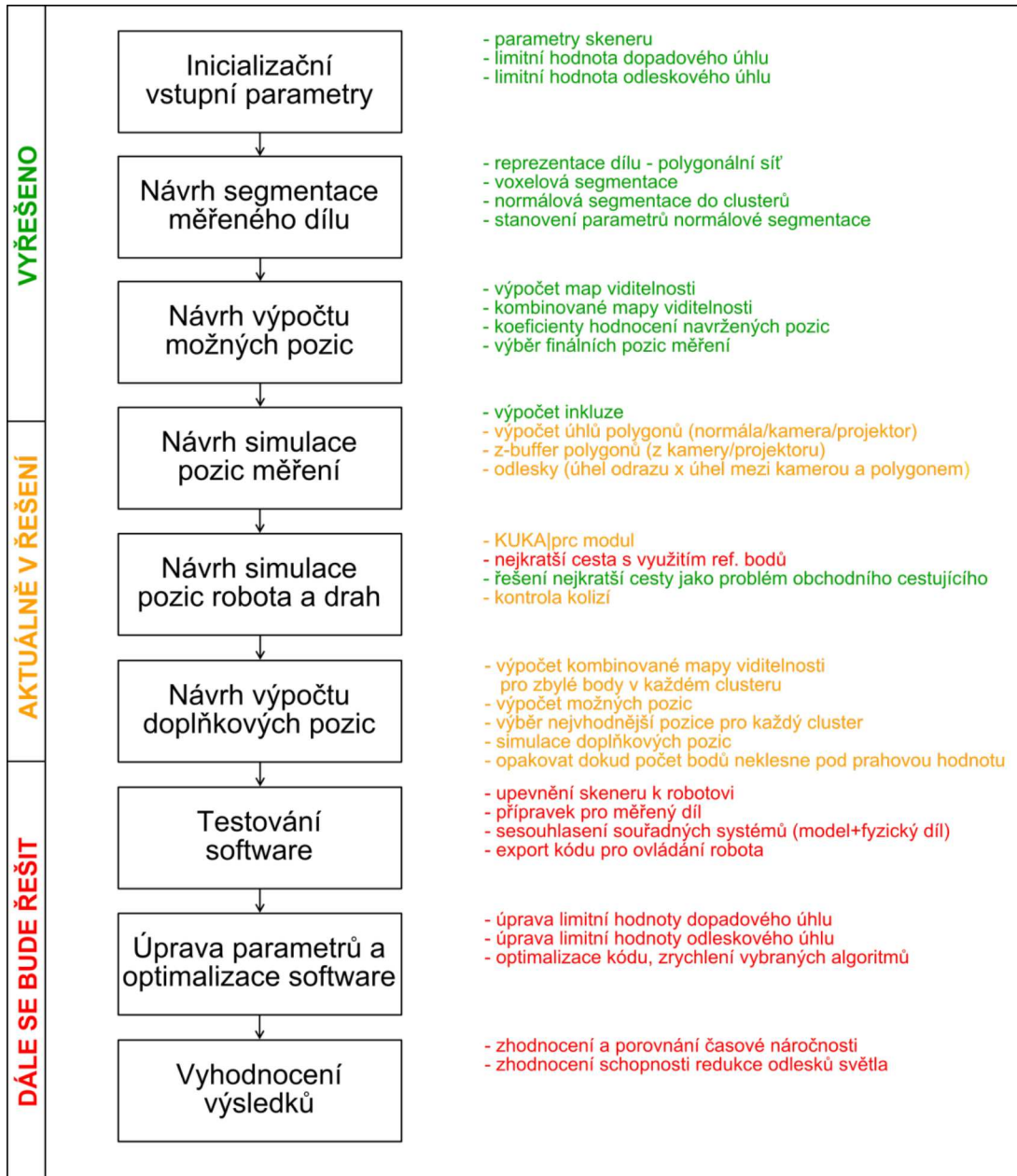
Jazyk Python byl zvolen k tvorbě finální aplikace pro svou relativní jednoduchost oproti zbývajícím dvěma jazykům, pro předchozí zkušenosti s tímto jazykem a také pro možnost tvorby jednodušších skriptů. Ty jsou užitečné zejména ve fázi testování a přípravy dílčích částí finální aplikace.

Pro řešení některých výpočtů je využívána knihovna NumPy. Ta je určena pro jazyk Python, ale je z velké části psána v jazyce C a poskytuje nástroje pro práci s maticemi, které jsou výpočetně velmi efektivní. Umožňuje tak například provádět výpočty týkající se obrazu, jako je změna měřítka nebo morfologické operace.

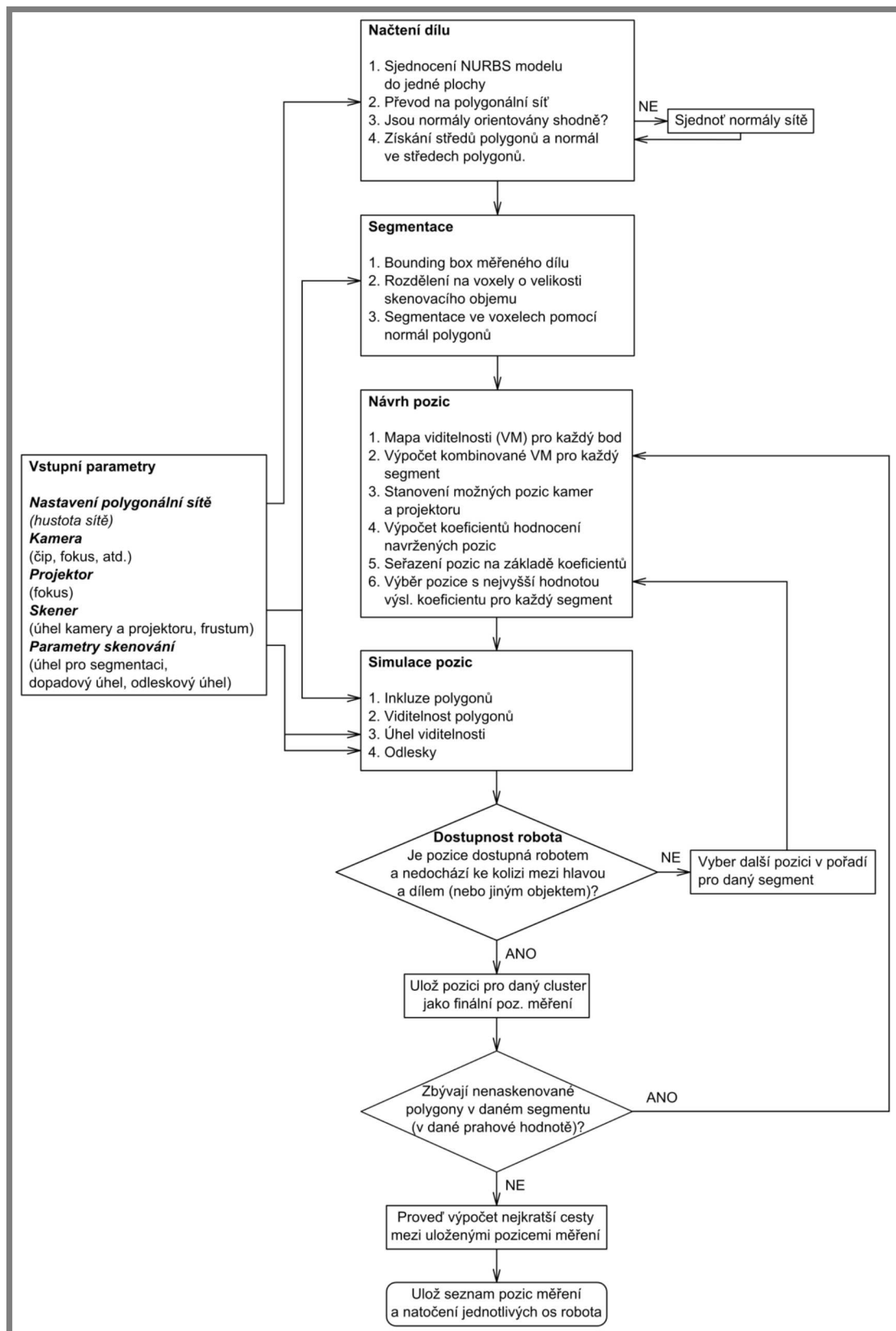
6.1 Metodika řešení

Na základě vypracované rešerše a zhodnocení možných přístupů k řešení byla vypracována následující metodika řešení. Největší část práce bude zaměřena na návrh a zpracování softwaru pro automatické generování měřicích pozic. Navržený software bude následně ověřen experimentem na testovacím plechovém dílu. Na základě testovacích měření bude následně řešena optimalizace softwaru a především úprava vstupních parametrů. Inicializační vstupní parametry budou stanoveny na základě zkušeností z předchozích měření autora práce a z testovacího měření popsaného v kapitole 6.7.

Metodika vychází z obecného přístupu k řešení plánování pozic senzoru (Sensor Planning), který je souhrnně popsán u Tarabanise [23]. Vychází z toho určení parametrů, které definují skener a přístupy ke stanovení vlastních pozic měření. Na Obr. 18 je znázorněn postup řešení a Obr. 19 popisuje navrženou metodiku řešení pomocí vývojového diagramu.



Obr. 18 Znáznornění postupu řešení



Obr. 19 Diagram metodiky řešení

6.2 Reprezentace měřeného dílu

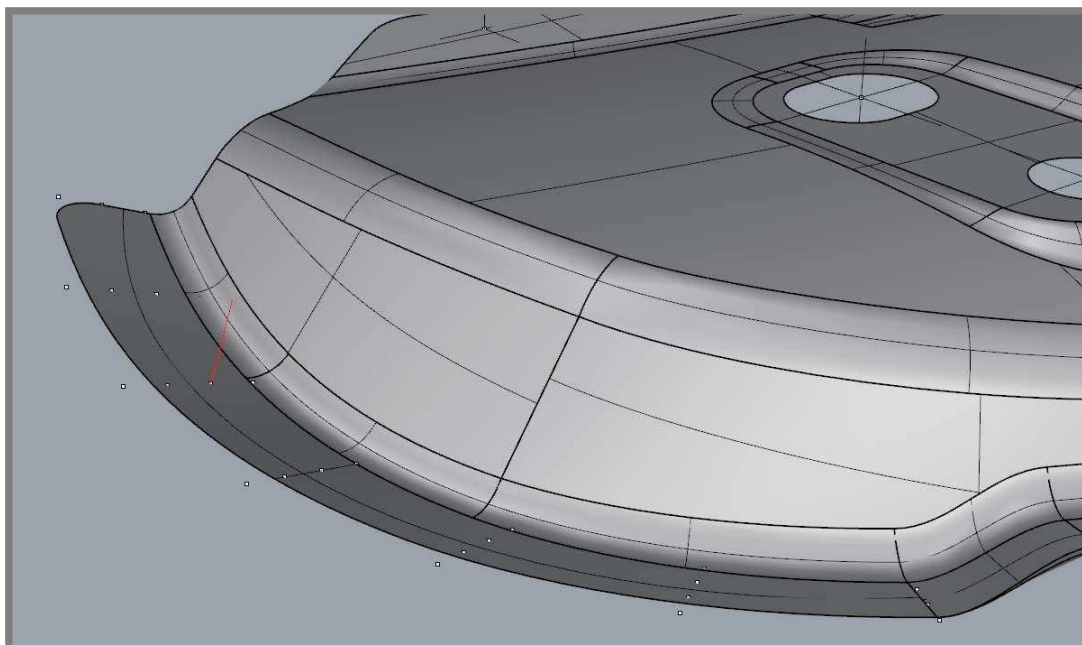
Vstupním formátem modelu měřeného dílu je univerzální přenosový formát STEP. Jedná se o standardní přenosový formát využívající aplikační protokoly AP 203 a 214. Jedná se o nástupce formátu IGES.

Model ve formátu STEP vykazuje při načítání do softwaru Rhinoceros menší chyby než formát IGES. Testovaný díl (a jeho model) je produktem firmy Škoda auto, a. s. a model byl vytvořen v softwaru CATIA. Tento díl je používán jako příkladový pro návrh aplikace a následné testování.

Pro práci s modelem se nabízejí dvě možné reprezentace:

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

V případě první možnosti vzniká tento model rovnou při importu STEP modelu do prostředí softwaru Rhinoceros. Výhodou této možnosti je zachování přesného tvaru modelu. Pro další práci s modelem je nutné získat jeho popis pomocí bodů na jeho povrchu a normál v těchto bodech. K tomu jsou v případě plošného modelu využity tzv. Greville body. Jedná se o body, které vzniknou průmětem řídicích bodů NURBS ploch (které leží většinou mimo samotnou plochu) do této plochy. Hustota těchto bodů závisí na změnách křivosti dané plochy. To je na jednu stranu velmi výhodné, body vhodně opisují změny křivosti celého tělesa, na druhou stranu mají plochy s nízkým stupněm křivosti velmi málo bodů, což je pro další účely nevýhodné. U takových ploch by se muselo provést dodatečné zhuštění řídicích bodů. Protože se zároveň jedná většinou o ořezané plochy, je nutné vyhodnotit, zda dané Greville body leží v neořezané části plochy. Greville body jedné plochy a normálu v jednom z těchto bodů je vidět na Obr. 20.

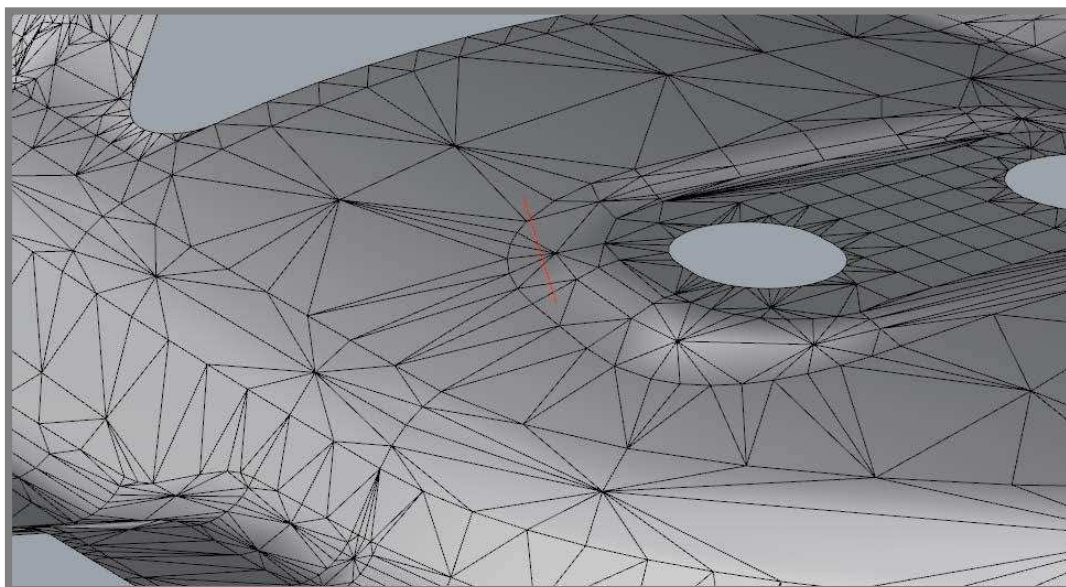


Obr. 20 NURBS reprezentace měřeného modelu s Greville body a normálou v jednom bodě

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. Generování polygonální sítě v softwaru Rhinoceros je možné řídit v závislosti na křivosti a tudíž je možné zachovat poměrně přesný detail při zachování nízkého počtu polygonů. 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. 21). Další výhodou je možnost určení plochy polygonů, což je uplatněno dále v části 6.4.

Další výhodou polygonální reprezentace je jednoduchost výpočtu průsečíku paprsku s polygonem, což je také uplatněno v části 6.4. Polygonální reprezentace je také výhodná pro simulaci vypočítaných měřicích pozic, část 6.5.



Obr. 21 Model reprezentovaný polygonální sítí s vyznačenou normálou u jednoho polygonu

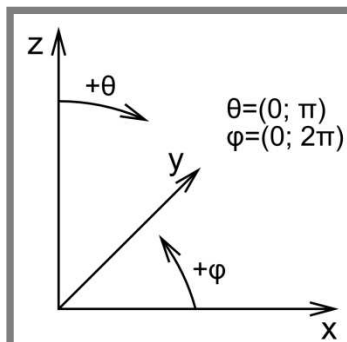
Z uvedených důvodů byla zvolena reprezentace modelu pomocí polygonální sítě. Předmětem testování bude využití různé hustoty sítě a její vliv na navržené pozice měření.

6.3 Segmentace měřeného dílu

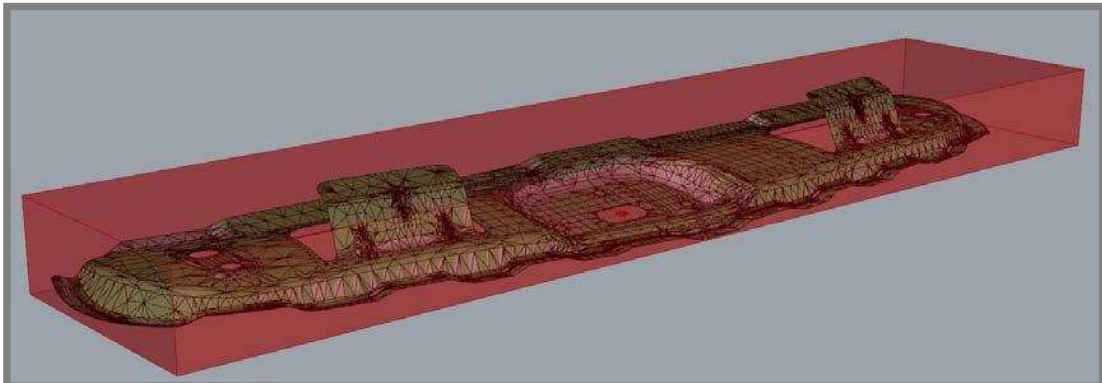
Pro účely určení vhodných pozic měření je nutné celý díl rozdělit na oblasti, které bude teoreticky možné zachytit na jeden záběr skeneru. Navrhovaná metoda je zaměřena na automatické měření plechových dílů, které mají převážně plošný charakter (rozměry dílu jsou výrazně větší v jednom nebo dvou rozměrech vůči třetímu rozměru) a díl se měří pouze z jedné strany. Z tohoto důvodu byla pro segmentaci vytvořena metoda popsána následujícím algoritmem:

1. Ulož středy všech polygonů a jejich normály
2. Vytvoř nejmenší obálkový kvádr (bounding box) měřeného dílu (Obr. 23)
3. Rozděl kvádr na krychle o velikosti nejmenšího rozměru měřicího objemu použité optiky skeneru (Obr. 24)

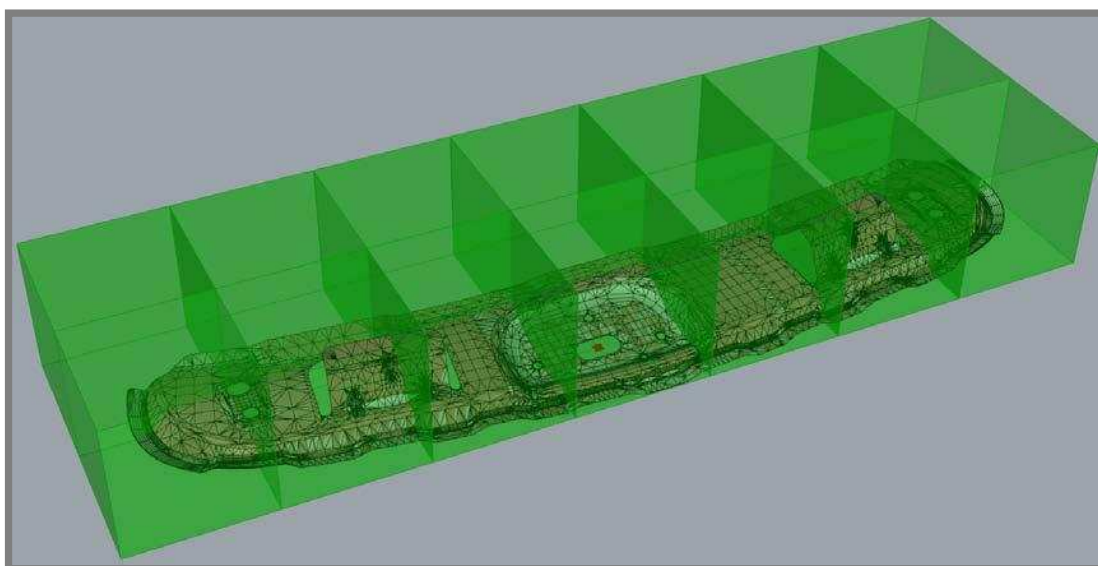
4. Vypočítej průměrnou váženou normálu středů polygonů v každé krychli (normály polygonů v jedné krychli viz Obr. 25)
5. Ulož do 1. clusteru všechny body, jejichž normály jsou do 45° elevace od průměrné normály (Obr. 26 a)
6. Do segmentů 2-5 ulož všechny body, jejichž normály mají úhel elevace od 45° do 135° a azimut postupně od 0° do 90° , 90° až 180° , atd. (Obr. 26 b)
7. Do clusteru 6 ulož body s normálami v úhlu elevace od 135° do 180° (Obr. 26 c)
8. Dále nepočítej s clustery s počtem bodů menším než přednastavená limitní hodnota (degenerované trojúhelníky, špatně orientovaná normála, apod.)



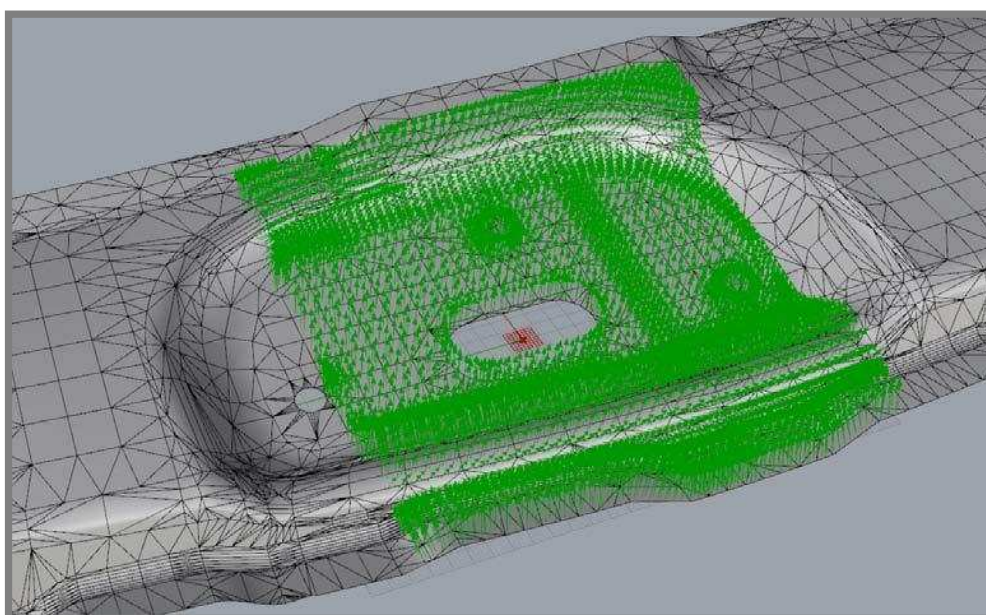
Obr. 22 Konvence úhlů elevace a azimutu



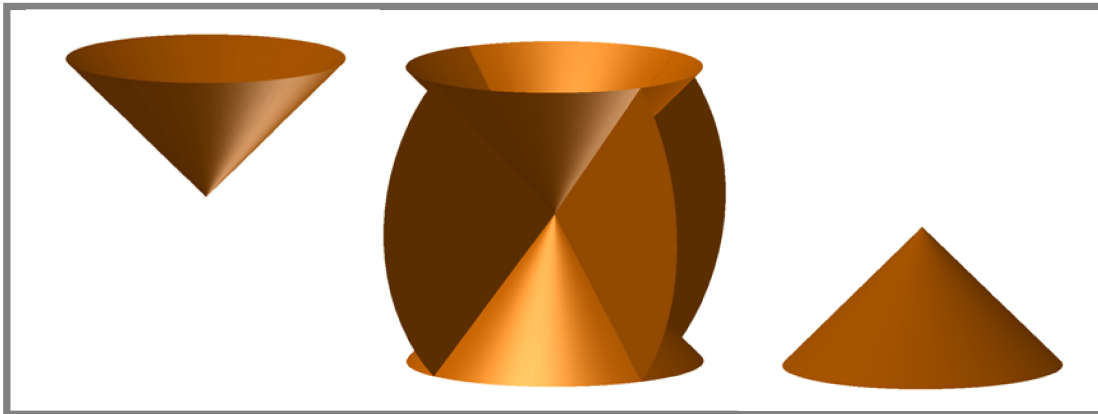
Obr. 23 Model měřeného dílu a jeho obálkový kvádr



Obr. 24 Obálkový kvádr tělesa rozdělený na krychle podle měřicího objemu skeneru



Obr. 25 Normály polygonální sítě v jedné z krychlí



Obr. 26 Segmentace podle normál; a) 1. segment; b) 2. - 5. segment; c) 6. segment

Způsob segmentace dílu se do určité míry shoduje s přístupem použitým v [24]. V tomto článku používají autoři princip dělení měřeného dílu na voxely podle změn křivosti v daném voxelu a tím pádem podle rozsahu normál zkoumaných polygonů. Jejich metoda má jistá omezení v možném vzniku velmi malých voxelů, čemuž by mělo být zabráněno kombinací více voxelů dohromady. Větší nevýhodou je však absence simulace a tedy ověření skutečné viditelnosti před měřením.

Předmětem testování bude ověření rozsahu úhlů použitých pro segmentaci. Z experimentů měření rovného plechového dílu (viz. část 6.7) vyplývá, že od úhlu 50° (vůči projektoru) se výrazně zhoršuje schopnost zaznamenat skenovaná data. V uvedeném článku [24] se uvádí pro skener ATOS Triple Scan limitní úhel průměrné normály segmentu a normály libovolného polygonu v hodnotě 60° .

Pro praktické řešení to tedy znamená, že bude testován úhel odklonu od průměrné normály 45° a 30° . U prvně zmíněného úhlu tak vznikne 6 segmentů (viz Obr. 26), u druhého 14 segmentů (velká část z nich může být prázdná).

6.4 Výpočet pozic měření

6.4

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

6.4.1 Výpočet map viditelnosti

K výpočtu pozic měření je využit koncept map viditelnosti a kombinovaných map viditelnosti (tzv. Combined Visibility Map). Jde o princip použitý v pracích [11], [12] a [13] a původně je tento koncept uveden v [25].

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 body budou rozmístěny pravidelně v rozmezí $\theta = \langle 0; \pi \rangle$; $\varphi = \langle 0; 2\pi \rangle$. Krok pro oba úhly zvol 5° .
 - 1.2. Pokud je vektorový součin paprsku a normály větší než 0,3, ulož hodnotu 0

- 1.3. Vyšli paprsek z bodu (střed polygonu) postupně skrze všechny body na kouli (viz Obr. 28)
- 1.4. Pokud paprsek protne nějaký polygon na modelu, ulož hodnotu 0
- 1.5. Pokud paprsek nic neprotne, ulož hodnotu 1
- 1.6. Ulož hodnoty do dvourozměrného pole

Krok v bodu 1.1 je zvolen na hodnotu 5° z důvodu úspory výpočetního času – výpočet se v každém bodě provádí pro 2 592 paprsků – zároveň je zachována vysoká popisnost. Hodnota použitá v práci [11] je 3° . V případě mé práce je však použito větší množství bodů na povrchu tělesa, a proto by měla být tato hodnota dostatečná.

V bodu 1.2 je použita uvedená podmínka, která zrychluje výpočet, protože se následující výpočet průniku paprsků polygonální sítě (mesh) počítá pouze pro 2/5 všech paprsků. Paprsky v úhlech elevace vzdálených cca 70° od normály plochy nemá smysl počítat, protože v takových úhlech by se plocha ani nemohla měřit.

Pro bod 1.3 byly testovány 3 různé příkazy, umožňující výpočet průniku paprsku s meshí. Výsledky se liší z důvodu různé implementace a jsou uvedeny hodnoty času pro výpočet 2 592 paprsků vyslaných z jednoho bodu:

Metoda	Čas [ms]
MeshRay komponent modulu Grasshopper	50
Rhino.Geometry.Intersect.Intersection.MeshRay	250
ghpythonlib.components.MeshXRay	300 000

Pro aktuální řešení byla zvolena druhá varianta, která je sice 5x pomalejší, než první, ale tu lze přímo v prostředí Rhinoceros použít jedině importem modulu *ghpythonlib*, což je třetí varianta. Její vysoké zpomalení je pravděpodobně způsobeno převody struktur. Vývojáři firmy McNeel na zrychlení tohoto komponentu dále pracují.

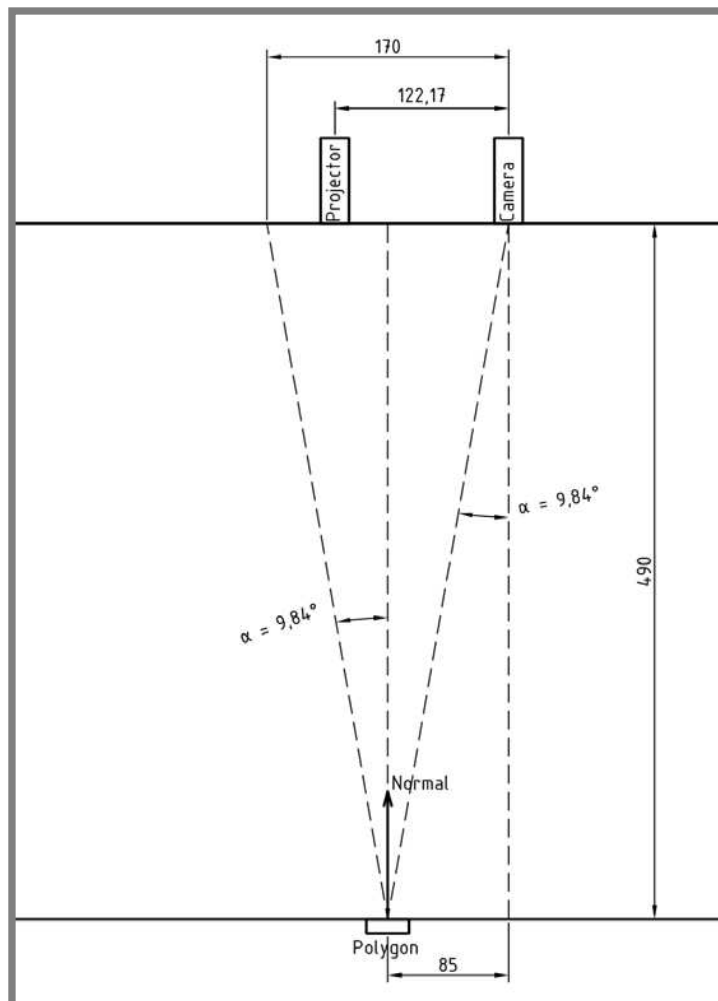
Následuje metoda kombinované mapy viditelnosti, která probíhá podle následujícího algoritmu:

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 dilataci* výsledného pole o hodnotu x

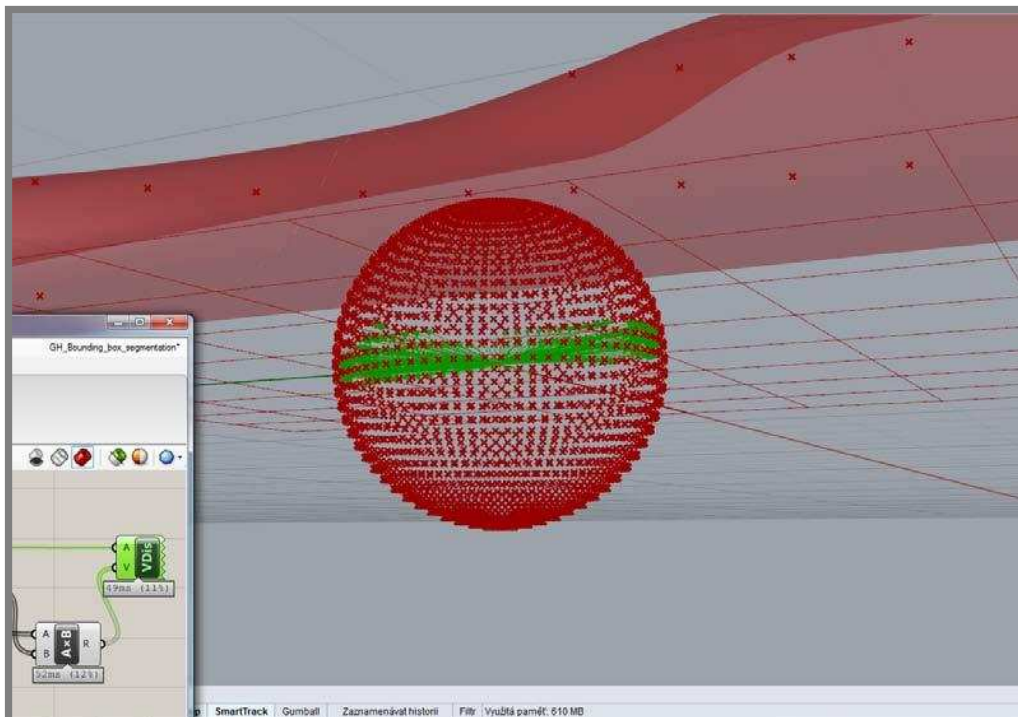
Metoda kombinované mapy viditelnosti dává dobrou informaci o viditelnosti plochy v případě, že vzdálenost skeneru je mnohem větší než zorné pole skeneru. V opačném případě se rozpětí úhlu, pod kterým jsou jednotlivé body plochy (segmentu) viditelné z konkrétní pozice, začíná zvětšovat. Z tohoto důvodu je zařazen krok dilatace výsledného pole o hodnotu x . Její hodnota bude závislá na použitém skeneru a optice a tedy poměru skenovací vzdálenosti a zorného pole a bude dále předmětem experimentů.

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

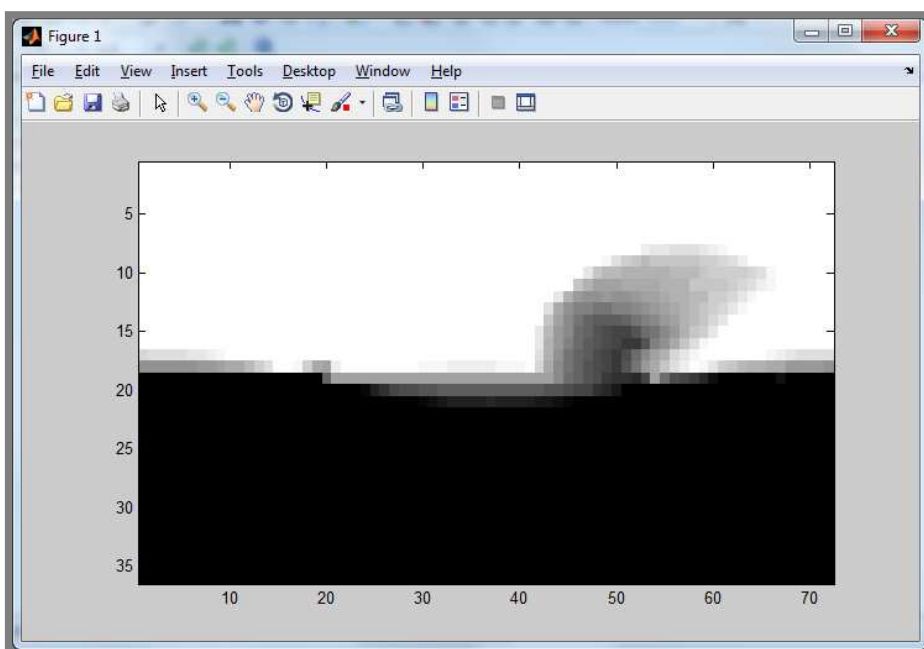
Z Obr. 27 je patrné, že při použití skeneru ATOS Triple Scan a měřicí optiky MV170 bude bod na kraji zorného pole při pozici kamery kolmo k ploše pozorovaný pod úhlem o $9,84^\circ$ jiným než bod uprostřed zorného pole.



Obr. 27 Viditelnost bodu na kraji zorného pole a jeho pozorovací úhel



Obr. 28 Mapa viditelnosti pro jeden bod na povrchu tělesa



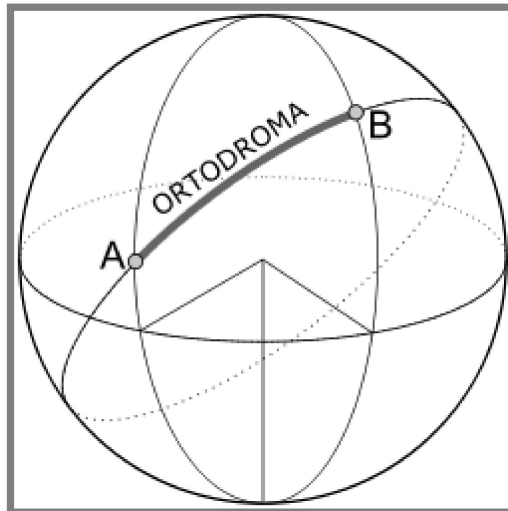
Obr. 29 Graficky znázorněná celková mapa viditelnosti v MATLABu

6.4.2 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 sférická kosinová věta, používaná pro výpočet ortodromy (nejkratší spojnice dvou bodů na kulové ploše):

$$\sigma = \arccos (\sin \theta_1 \sin \theta_2 + \cos \theta_1 \cos \theta_2 \cos (\varphi_1 - \varphi_2)) \quad (11)$$

kde σ je úhel mezi dvěma body na kulové ploše, 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 pozice kamery (projektoru).



Obr. 30 Ortodroma - vzdálenost dvou bodů na kulové ploše [29]

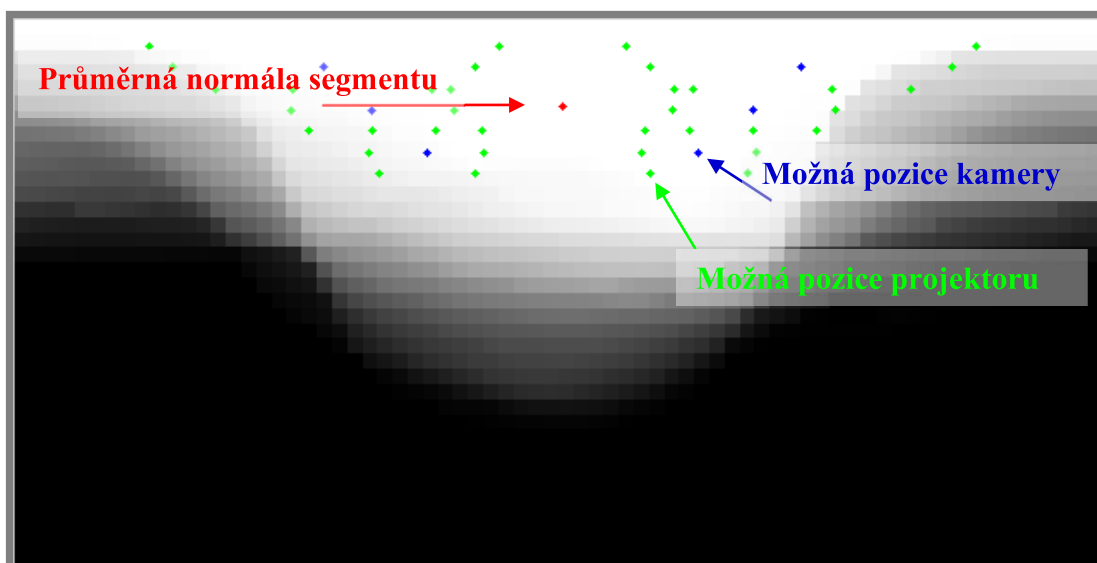
Z tohoto vzorce je odvozena závislost pro výpočet úhlu azimutu λ_2 neznámé pozice kamery (projektoru), přičemž ostatní proměnné jsou známé:

$$\varphi_2 = \varphi_1 - \arccos \left(\frac{\cos \sigma - \sin \theta_1 \sin \theta_2}{\cos \theta_1 \cos \theta_2} \right) \quad (12)$$

Jediným problémem je volba elevace θ_2 , jejíž možný rozsah se mění v závislosti na elevaci průměrné normály segmentu. Dosazením různých hodnot elevace (v závislosti na možném rozsahu) získáme 6 možných pozic první kamery $C1_{\theta_i}$ a $C1_{\varphi_i}$. Úhel σ , což je úhel mezi průměrnou normálou segmentu a směrem kamery, je nastaven na hodnotu 30° . Tato hodnota vychází z kapitoly 6.7.

Stejným způsobem jsou dopočítány možné pozice projektoru P_{θ_i} a P_{φ_i} . Zde je pouze pro úhel σ použita hodnota úhlu mezi kamerou a projektorem daného skeneru. Hodnoty elevace a azimutu θ_1 a φ_1 jsou v tomto případě odvozeny z možných směrů kamery.

Možné pozice druhé kamery $C2_{\theta_i}$ a $C2_{\varphi_i}$ jsou již závislé a jsou vypočítány společně s možnými pozicemi projektoru.



Obr. 31 Kombinovaná mapa viditelnosti s možnými pozicemi kamery a projektoru

6.4.3 Způsob výběru skutečných pozic měření

Pro posouzení a výběr nejuvhodnější pozice pro každý segment byla vyvinuta metrika závislá na následujících parametrech:

- Koeficient viditelnosti

$$Cf_{vis} = C1_{vis}P_{vis}C2_{vis} \quad (13)$$

- data získaná z celkové mapy viditelnosti pro každou pozici kamery 1 a 2 a projektoru ($C1_{vis}$, $C2_{vis}$, P_{vis}); hodnoty v rozmezí 0-1; 0 – žádný bod segmentu není viditelný, 1 – všechny body segmentu jsou viditelné

- Koeficient shodné elevace kamery a projektoru

$$Cf_{\theta} = \left| \left(\frac{|C1_{\theta} - P_{\theta}|}{\gamma} \right) - 1 \right| \quad (14)$$

- Koeficient, jehož vyšší hodnota zajišťuje shodnou orientaci kamery a projektoru podél úhlu elevace; γ – úhel mezi kamerou a projektorem daného skeneru

- Koeficient orientace objektu

$$Cf_{obj_or} = \sqrt{\theta_{or} \cdot \varphi_{or}} \quad (15)$$

- kde v závislosti na nejdelší straně objektu je:

- x:

$$\theta_{or} = \left| \left(\frac{|C_{\theta} - P_{\theta}|}{\gamma} \right) - 1 \right| \quad (16)$$

$$\varphi_{or} = (\sin C_{\varphi})^2 \cdot (\sin P_{\varphi})^2 \quad (17)$$

- y:

$$\theta_{or} = \left| \left(\frac{|C_\theta - P_\theta|}{\gamma} \right) - 1 \right| \quad (18)$$

$$\varphi_{or} = (\cos C_\varphi)^2 \cdot (\cos P_\varphi)^2 \quad (19)$$

▪ z:

$$\theta_{or} = (\sin C_\theta)^2 \cdot (\sin P_\theta)^2 \quad (20)$$

$$\varphi_{or} = \left| \left(\frac{|C_\varphi - P_\varphi|}{\gamma} \right) - 1 \right| \quad (21)$$

- Koeficient orientace segmentu

$$Cf_{seg_or} = \sqrt{\theta_{or} \cdot \varphi_{or}} \quad (22)$$

- výpočet hodnot θ_{or} a φ_{or} je shodný s výpočtem výše s tím rozdílem, že se počítá pro nejdelší stranu aktuálního segmentu

- Koeficient orientace druhé kamery

$$C_{2cam} = \left| \left(\frac{|\sigma - \beta_n|}{(\beta_n + 2\gamma)} \right) - 1 \right| \quad (23)$$

- koeficient bude mít nejvyšší hodnotu v případě, kdy bude druhá kamera pod úhlem 30° vůči normále segmentu; σ – úhel mezi druhou kamerou a normálou segmentu, β_n – ideální úhel mezi kamerou a normálou (30°), γ – úhel mezi kamerou a projektorem

Výsledný koeficient, určující vhodnost každé pozice, je vypočítán jako:

$$Cf_{pos} = a \cdot Cf_{vis} + b \cdot Cf_\theta + c \cdot Cf_{obj_or} + d \cdot Cf_{seg_or} + e \cdot C_{2cam} \quad (24)$$

kde a , b , c , d jsou váhové koeficienty ovlivňující vliv jednotlivých koeficientů. V současné době jsou nastaveny na hodnoty – $a = 5$, $b = 1$, $c = 1,5$, $d = 2$, $e = 2$. Tyto koeficienty budou na základě testování dále upravovány.

Vypočítané možné pozice jsou na základě koeficientu Cf_{pos} seřazeny a dále jsou do výpočtu uvažovány pozice s nejvyšší hodnotou tohoto koeficientu. V případě iteračního řešení, kdy je zjištěno, že pozice je nedosažitelná robotem nebo v ní dochází ke kolizi mezi dílem a skenerem, je vybrána následující pozice v seznamu.

6.5 Simulace vypočítaných pozic

6.5

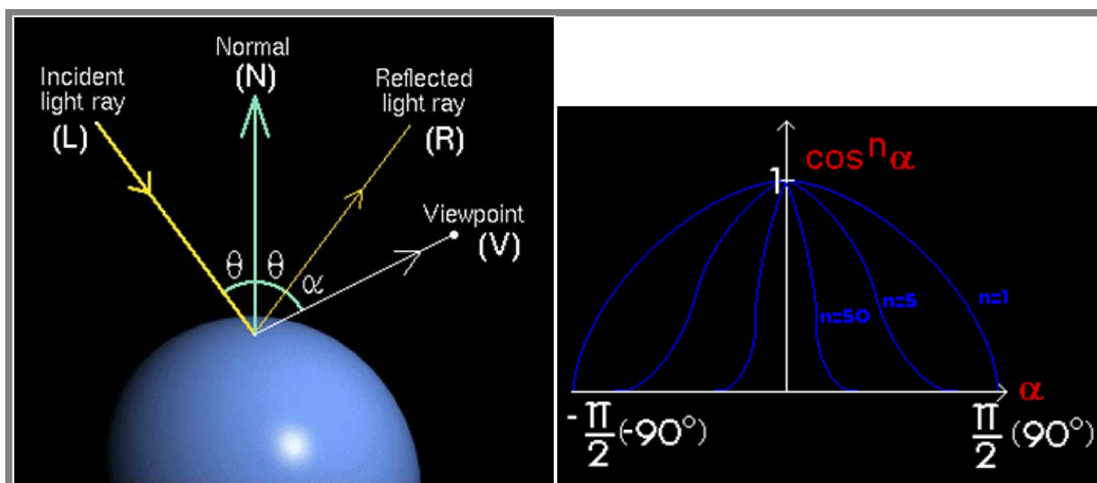
6.5.1 Simulace viditelnosti polygonů

V rámci simulace je nutné ověřit, „co bude z dané pozice skutečně vidět“. Kombinovaná mapa viditelnosti je pouze vodítkem pro výpočet vhodných pozic

skenování, neřeší však zcela možné okluze, odrazy světelného vzoru zpět do kamery, inkluzi jednotlivých polygonů a nemožnost naskenovat polygony z důvodu vysokého úhlu dopadajícího světla. Z tohoto důvodu je v simulaci nutné pro každou vypočítanou pozici toto ověřit.

1. *Inkluze polygonů* – řeší, jaké polygony se nacházejí v tzv. frustu, zorném poli kamery/projektoru. Jedná se o komolý jehlan a inkluze polygonů v tomto jehlanu je řešena pomocí funkce *brep.IsPointInside()*
2. *Omezení úhlem viditelnosti* – vektorový součin úhlu mezi normálou polygonu a vektorem z kamery (projektoru) ke středu polygonu musí být větší než limitní hodnota
3. *Okluze polygonů* – řešeno pomocí porovnání vzdálenosti polygonu ve směru z kamery/projektoru a je k tomuto využita funkce *Rhino.Geometry.Intersect.Intersection.MeshRay* (případně Z-buffer)
4. *Odrazy světla* – řídí se lesklou složkou odrazu z Phongova osvětlovacího modelu (v rovnici 25 třetí člen). Ta je určena skalárním součinem mezi paprsky R a V (viz Obr. 32) a exponentem lesklosti n.

$$I = c_a I_a + c_d I_d(NL) + c_s I_s(VR)^n \quad (25)$$



Obr. 32 Phongův model a vliv exponentu lesklosti materiálu [28]

6.6 Simulace pozic robota a drah

6.6

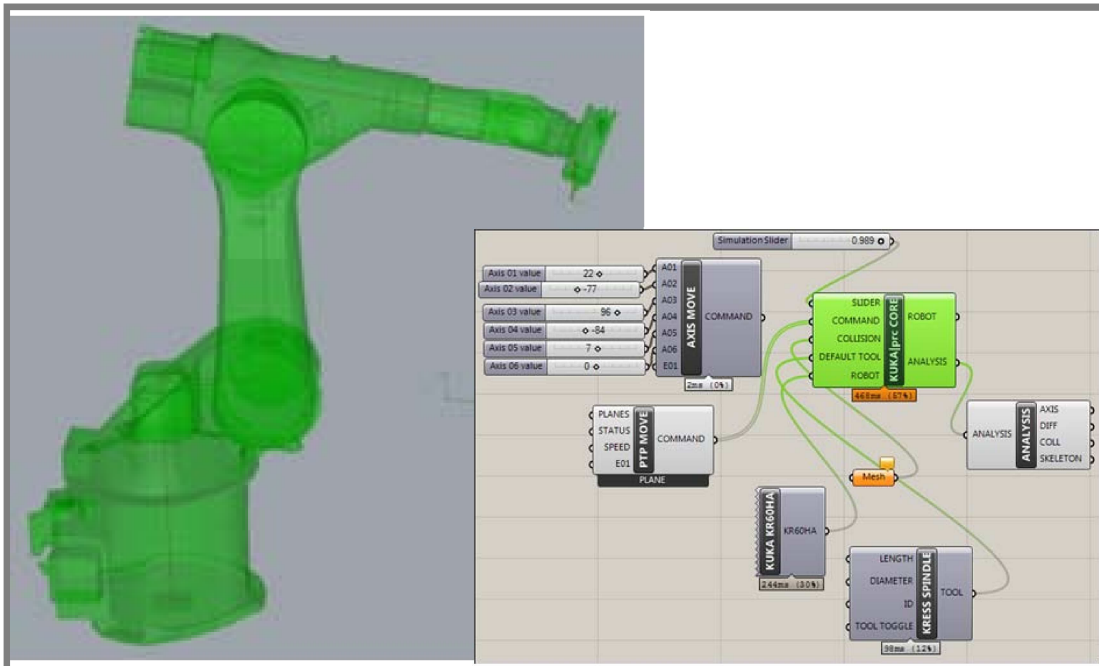
Simulace pozic robota a jeho drah bude řešena pomocí modulu pro Grasshopper, KUKA|prc. Ten má široké možnosti simulace různých typů robotů KUKA (viz Obr. 33). Především je určen pro generování drah obrábění, poskytuje však i možnost tvorby vlastních obecných obráběcích nástrojů, toho bude využito k tvorbě nástroje v podobě skenovací hlavy.

Pomocí komponentu GhPython modulu Grasshopper je možné použít komponenty modulu KUKA|prc ve skriptovacím editoru a dále je automatizovat.

Hledání nejkratší cesty (propojení známých pozic, mezi nimiž jsou známe vzdálenosti) je poměrně známý problém a řeší se jako „Problém obchodního cestujícího“. V oblasti automatického skenování řeší tuto problematiku například

článek [26]. V této práci je použit aproximační řešič, který nachází suboptimální řešení a využívá hladový algoritmus (s polynomiální složitostí) s následnou optimalizací [27]:

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



Obr. 33 Ukázka kinematické simulace robota v prostředí Grasshopper a modulu KUKA|prc

6.7 Experimentální měření

V uvedeném experimentu byla ověřována schopnost zaznamenání povrchu rovného plechového dílu pomocí skeneru s proužkovou projekcí (ATOS Triple Scan) při změně dvou parametrů:

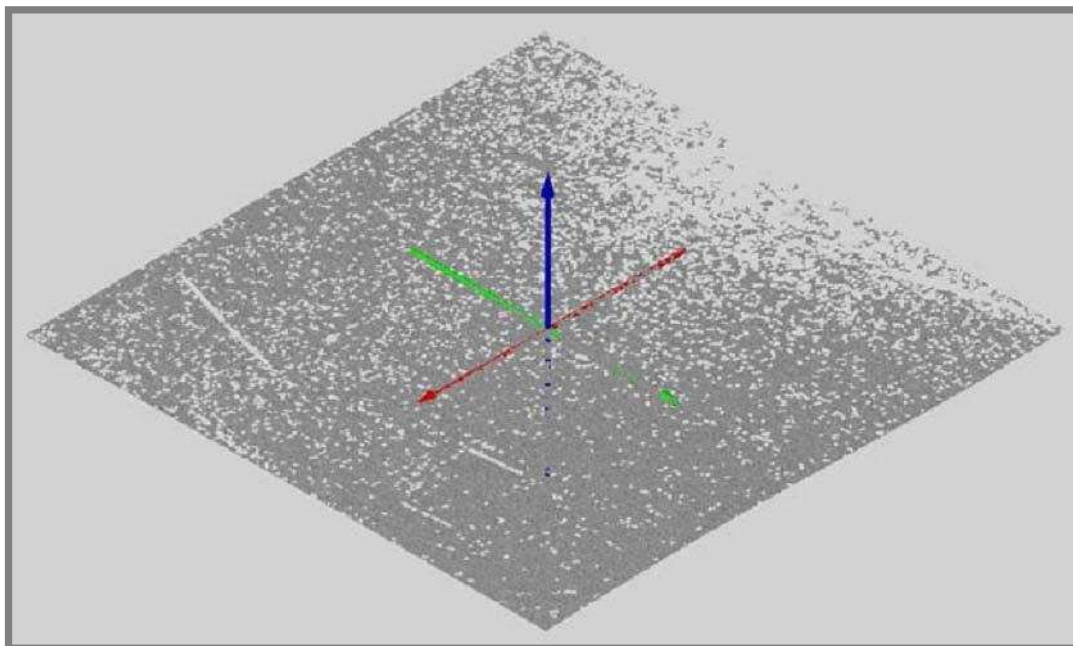
- úhel skenování
- expoziční čas kamery

Experiment byl proveden pro rovný plechový díl a vyhodnocován pro oblast 80 x 80 mm (viz Obr. 34). Pro měření byla použita optika MV170. Cílem měření bylo zjistit limitní úhel, od kterého je zachycení povrchu u plechového dílu problematické a jakou roli v tom hraje čas expozice.

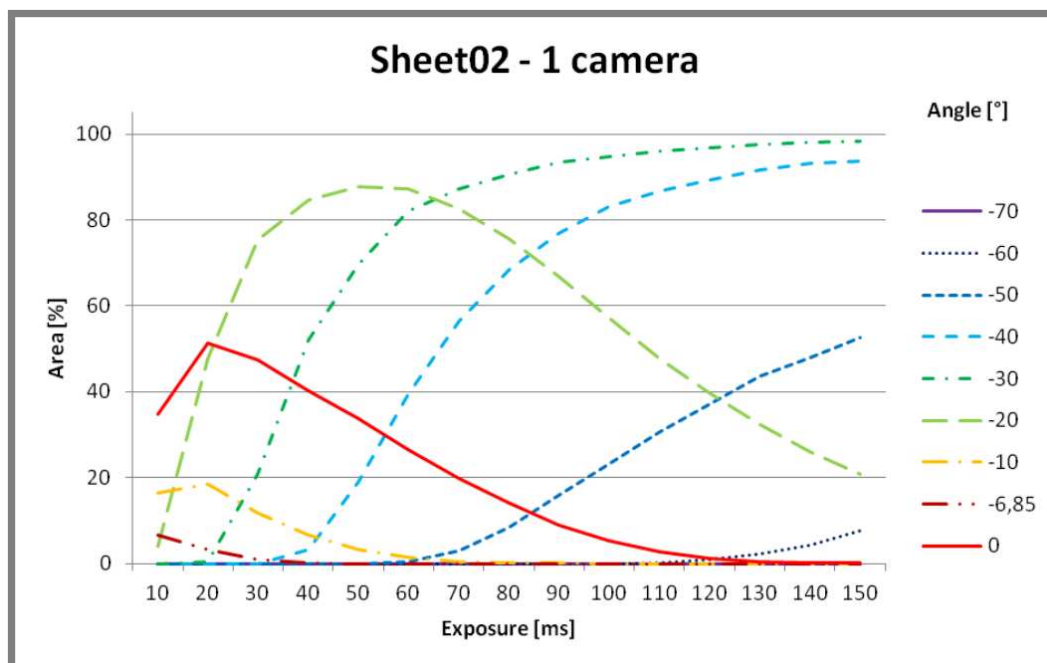
Výsledky ukázaly, že limitním úhlem je v daných podmínkách úhel mezi 40 – 50° (viz Obr. 35). Od těchto úhlů musí být expoziční čas velmi dlouhý a i tak nedochází k dobrému zachycení povrchu. Informace o limitním úhlu je použita jako jeden ze vstupních parametrů připravovaného systému a více je zmíněno v kapitolách 6.3 a 6.4.2.

Výsledky z experimentálního měření byly publikovány v článku:

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.



Obr. 34 Polygonální data na ploše 80 x 80 mm, 1 kamera, 20°, 70 ms



Obr. 35 Závislost naskenovaných dat na úhlu skenování a expozičním času

7 ZÁVĚR

Pojednání ke státní doktorské zkoušce shrnuje poznatky z oblasti automatizace inspekčního měření, především se zaměřením na měření pomocí 3D optických skenerů využívajících strukturovaného světla. U měření těmito skenery se pak zaměřuje na automatizované hledání jejich pozic pro měření. Z literární rešerše vyplývá, že takové automatizované systémy vznikají, zatím však převážně pro jednokamerové systémy. Tato řešení navíc neuvažují osvětlovací a reflexní modely, které by výpočtově řešily možné odlesky světla, které negativně ovlivňují měření, a na základě toho navrhovaly měřicí pozice. Uvedené práce často řeší měření obecných strojních dílů nebo navrhují více přístupů pro různé typy měření a různé díly. Pro plechové díly je však toto řešení zjednodušené. Automatickým měřením plechových dílů a redukcí negativních vlivů vznikajících při takovém měření se věnuje zpracovávaná dizertační práce. Výsledkem by měl být systém umožňující na základě CAD modelu měřeného plechového dílu generovat pozice pro skenování pomocí dvoukamerového systému s proužkovou projekcí. Ohled bude brán na možné odlesky světla a nesnadné skenování při velkých náklonech dílu vůči skeneru. Přínos následující dizertační práce by měl být v konečném důsledku ve zrychlení a zjednodušení přípravy automatizovaného inspekčního měření.

Práce je v současné době ve vývojové fázi softwaru pro generování měřicích pozic. Následně bude testován v laboratorních podmínkách spolu s průmyslovým robotem KUKA KR60HA na testovacích plechových dílech. Výsledky z testovacích měření budou použity pro přesnější stanovení vstupních parametrů a úpravu software. Z výsledků testování budou také vyvozeny závěry a systém bude porovnán s výsledky z ručního měření a s výsledky z obdobných studií.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Generování měřicích bodů na základě lokální křivosti [3].....	7
Obr. 2 Metoda registrace pomocí odsazené plochy [4]	8
Obr. 3 Plochy použité pro testování vzorkovacích algoritmů [5].....	10
Obr. 4 Vygenerované pohledy laserového skeneru [6].....	11
Obr. 5 Rozměrové a úhlové tolerance [9].....	14
Obr. 6 CAD model a voxelový model testovacího objektu [10]	15
Obr. 7 Graf pozic a cest skeneru [11]	16
Obr. 8 Struktura inspekčního systému [11]	17
Obr. 9 Automatické nalezení vhodných pozic pro měření [12].....	18
Obr. 10 Vypočítané měřicí pozice a simulace měření [13]	20
Obr. 11 Ukázka odlesku na měřeném povrchu [14]	22
Obr. 12 Měření dílu s málo kontrastními oblastmi [15]	23
Obr. 13 Šachovnice s promítnutým vzorem s různými expozičními časy a výsledným obrazem [16]	24
Obr. 14 Ukázka skenovaného objektu metodou HDRS [16].....	25
Obr. 15 Obraz objektu s různou intenzitou osvětlení a různou radiační mapou [17] 26	
Obr. 16 Ukázka použití navrženého kódování světelného vzoru [20].....	27
Obr. 17 Měřený objekt, snímek s vysokým dynamickým rozsahem a výsledná hloubková mapa [18]	28
Obr. 18 Znázornění postupu řešení.....	33
Obr. 19 Diagram metodiky řešení.....	34
Obr. 20 NURBS reprezentace měřeného modelu s Greville body a normálou v jednom bodě.....	35
Obr. 21 Model reprezentovaný polygonální sítí s vyznačenou normálou u jednoho polygonu	36
Obr. 22 Konvence úhlů elevace a azimutu	37
Obr. 23 Model měřeného dílu a jeho obálkový kvádr	37
Obr. 24 Obálkový kvádr tělesa rozdělený na krychle podle měřicího objemu skeneru	38
Obr. 25 Normály polygonální sítě v jedné z krychlí.....	38
Obr. 26 Segmentace podle normál; a) 1. segment; b) 2. - 5. segment; c) 6. segment 39	
Obr. 27 Viditelnost bodu na kraji zorného pole a jeho pozorovací úhel	41
Obr. 28 Mapa viditelnosti pro jeden bod na povrchu tělesa	42
Obr. 29 Graficky znázorněná celková mapa viditelnosti v MATLABu.....	42
Obr. 30 Ortodroma - vzdálenost dvou bodů na kulové ploše [29]	43
Obr. 31 Kombinovaná mapa viditelnosti s možnými pozicemi kamery a projektoru 44	
Obr. 32 Phongův model a vliv exponentu lesklosti materiálu [28]	46
Obr. 33 Ukázka kinematické simulace robota v prostředí Grasshopper a modulu KUKA prc	47
Obr. 34 Polygonální data na ploše 80 x 80 mm, 1 kamera, 20°, 70 ms.....	48
Obr. 35 Závislost naskenovaných dat na úhlu skenování a expozičním času	48

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] NEWMAN, T. S.; JAIN, A. K. CAD-based inspection of 3D objects : using range images. In *CAD-Based Vision Workshop, 1994. : Proceedings of the 1994 Second*. Champion, PA , USA : , 1994. s. 236 - 243.
- [2] ELMARAGHY, H. A.; ELMARAGHY, W. H. *Manufacturing Research and Technology : Advances in Feature-Based Manufacturing*. Amsterdam : Elsevier Science, 1994. Computer Aided Inspection Planning (CAIP), s. 363-395.
- [3] AINSWORTH, I.; RISTIC, M.; BRUJIC, D. Visual CAD-based measurement and path planning for free-form shapes. In *7th International Conference in Central Europe : Computer Graphics, Visualisation and Interactive Digital Media*. Prague, Czech Republic, 1999.
- [4] AINSWORTH, I., RISTIC, M., BRUJIC, D. CAD-Based Measurement Path Planning for Free-Form Shapes Using Contact Probes. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2000, roč. 16, č. 1, s. 23-31 [cit. 2012-05-29]. ISSN 0268-3768. DOI: 10.1007/PL00013128. Dostupné z: <http://www.springerlink.com/index/10.1007/PL00013128>
- [5] ELKOTT, D. F., ELMARAGHY, H. A., ELMARAGHY W. H. Automatic sampling for CMM inspection planning of free-form surfaces. *International Journal of Production Research* [online]. 2002, roč. 40, č. 11, s. 2653-2676 [cit. 2012-05-29]. ISSN 0020-7543. DOI: 10.1080/00207540210133435. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00207540210133435>
- [6] PRIETO, F., et al. CAD-based range sensor placement for optimum 3D data acquisition. In *3-D Digital Imaging and Modeling, 1999. : Proceedings. Second International Conference on* . Ottawa, Ont., Canada, 1999. s. 128-137.
- [7] PRIETO, F., et al. Inspection of 3D parts using high accuracy range data. In Proc. SPIE 3966, 82 : *Machine Vision Applications in Industrial Inspection VIII*. San Jose, CA, USA, 2000.
- [8] P.J. Besl and N.D. McKay, A method for registration of 3-D shapes,"IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence14, pp. 239-256, February 1992
- [9] PRIETO, F., et al. An Automated Inspection System. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2002, Volume 19, Issue 12, s. 917-925.
- [10] MARTINS, F. A. R., GARCÍA-BERMEJO, J. G., CASANOVA, E. Z., PERÁN GONZÁLEZ, J. R. Automated 3D surface scanning based on CAD model. *Mechatronics* [online]. Boca Raton: Taylor, 2006 [cit. 2012-05-30]. DOI: 10.1016/j.mechatronics.2005.01.004. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0957415805000371>
- [11] GERMANI, M.; MENGONI, M.; RAFFAELI, R. Automation of 3D View Acquisition for Geometric Tolerances Verification. In *2009 IEEE 12th*

- International Conference on Computer Vision Workshops : ICCV Workshops*. 2009. s. 1710-1717.
- [12] GERMANI, M., et al. CAD-based environment to bridge the gap between product design and tolerance control. *Precision Engineering*. January 2010, Volume 34, Issue 1, s. 7-15.
- [13] RAFFAELI, R.; MENGONI, M.; GERMANI, M.; MANDORLI, F. Off-line view planning for the inspection of mechanical parts. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)* [online]. - [cit. 2012-05-27]. ISSN 1955-2513. DOI: 10.1007/s12008-012-0160-1. Dostupné z: <http://www.springerlink.com/index/10.1007/s12008-012-0160-1>
- [14] SHI, Q., XI, N., SHENG, W., CHEN, Y. Development of dynamic inspection methods for dimensional measurement of automotive body parts. In: *2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation:ICRA 2006* [online]. 2006 [cit. 2012-05-31]. ISBN 978-078039506-0. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1641730&userType=inst>
- [15] SHI, Q., XI, N., SHENG, W. Recursive measurement process for improving accuracy of dimensional inspection of automotive body parts. In: *2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation:ICRA'07* [online]. 2007 [cit. 2012-05-31]. ISBN 978-142440602-9. Dostupné z: <http://ascc.okstate.edu/paper/4209831.pdf>
- [16] YAU, Shing-Tung a Song ZHANG. High dynamic range scanning technique. *Optical Engineering*. 2009-03-01, vol. 48, issue 3, s. 033604-. DOI: 10.1117/1.3099720. Dostupné z: <http://opticalengineering.spiedigitallibrary.org/article.aspx?doi=10.1117/1.3099720>
- [17] 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*. IEEE Comput. Soc, 2000, s. 778-781. ISBN 0-7695-0750-6. DOI: 10.1109/ICPR.2000.905506. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=905506>
- [18] 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. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2011.11.021. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0143816612000978>
- [19] 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/ISSN 1063-6919. DOI: 10.1109/CVPR.2011.5995321.

Dostupné z:

<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5995321>

- [20] GUPTA, Mohit, Amit AGRAWAL, Ashok VEERARAGHAVAN a Srinivasa G. NARASIMHAN. A Practical Approach to 3D Scanning in the Presence of Interreflections, Subsurface Scattering and Defocus. *International Journal of Computer Vision*. 2013, vol. 102, 1-3, s. 33-55. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s11263-012-0554-3>.
- [21] ZHAO, H., KRUTH, J-P., VAN GESTEL, N., BOECKMANS, B., BLEYS, P. Automated dimensional inspection planning using the combination of laser scanner and tactile probe. *Measurement* [online]. 2012, roč. 45, č. 5, s. 1057-1066 [cit. 2012-06-02]. ISSN 02632241. DOI: 10.1016/j.measurement.2012.01.037. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0263224112000528>
- [22] SŁADEK, J., et al. The hybrid contact–optical coordinate measuring system. *Measurement*. March 2011, Volume 44, Issue 3, s. 503-510. ISSN 02632241. DOI: 10.1016/j.measurement.2010.11.013. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224110003039>
- [23] TARABANIS, K.A., P.K. ALLEN a R.Y. TSAI. A survey of sensor planning in computer vision. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*. 1995, vol. 11, issue 1, s. 86-104. DOI: 10.1109/70.345940. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=345940>
- [24] LARTIGUE, Claire, Yann QUINSAT, Charyar MEHDI-SOUZANI, Alexandre ZUQUETE-GUARATO a Shadan TABIBIAN. Voxel-based Path Planning for 3D Scanning of Mechanical Parts. *Computer-Aided Design and Applications*. 2014-03-04, vol. 11, issue 2, s. 220-227. DOI: 10.1080/16864360.2014.846096. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/16864360.2014.846096>
- [25] STÖßEL, Dirk, Marc HANHEIDE, Gerhard SAGERER, Lars KRÜGER a Marc ELLENRIEDER. Feature and Viewpoint Selection for Industrial Car Assembly. *Pattern Recognition*. 2004, č. 3175, s. 528-535. DOI: 10.1007/978-3-540-28649-3_65. Dostupné z: http://link.springer.com/10.1007/978-3-540-28649-3_65
- [26] 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. DOI: 10.3182/20020721-6-ES-1901.00023. Dostupné z: <http://www.ifac-papersonline.net/Detailed/25656.html>
- [27] SHINTYAKOV, Dmitry. Tsp-solver. *GitHub* [online]. 2011 [cit. 2014-06-25]. Dostupné z: <https://github.com/dmishin/tsp-solver>
- [28] TIŠNOVSKÝ, Pavel. Grafická knihovna OpenGL: Phongův osvětlovací model. *ROOT.CZ: Informace nejen ze světa Linuxu* [online]. 2003 [cit. 2014-06-26]. Dostupné z: <http://www.root.cz/clanky/opengl-19-phonguv-osvetlovaci-model/>

- [29] Ortodroma. WIKIMEDIA FOUNDATION. *Wikipedie: Otevřená encyklopedie* [online]. 2013 [cit. 2014-07-07]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Ortodroma>

