



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

K618 – Ústav mechaniky a materiálů

**Vliv povrchových vlastností na tvorbu modelu
pomocí 3D skeneru**

Diplomová práce

Studijní program: Technika a technologie v dopravě a spojích
Studijní obor: Dopravní systémy a technika

Vedoucí: Ing. Jan Vyčichl, Ph.D.

Praha 2015

Bc. Romana Vejrážková



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní
děkan
Konviktská 20, 110 00 Praha 1

K618**Ústav mechaniky a materiálů**

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

Bc. Romana Vejrážková

Kód studijního programu a studijní obor studenta:

N 3710 – DS – Dopravní systémy a technika

Název tématu (česky): **Vliv povrchových vlastností na tvorbu modelu pomocí 3D skeneru**

Název tématu (anglicky): The influence of surface properties on the creation of model using a 3D scanner

Zásady pro vypracování

Při zpracování diplomové práce se řiďte osnovou uvedenou v následujících bodech:

- V obecné části uvést do problematiky reverzního inženýrství, konkrétně oblasti 3D skenování. Stručně pojednat o historii, jednotlivých typech 3D skenerů a jejich principu fungování a využití.
- Vytvořit sestavu geometricky identických objektů (vzorků), které budou mít různou povrchovou úpravu. Geometrie vzorků bude vytvořena tak, aby postihovala několik základních geometrických tvarů a přechodů mezi nimi. Na základě provedených skenů a rozboru vlivu povrchových vlastností na kvalitu vytvořeného povrchového modelu, odvodit závěry a sestavit doporučení pro využívání 3D skeneru při vytváření složitějších modelů.

- Rozsah grafických prací: dle pokynů vedoucího DP v textu nebo příloze
- Rozsah průvodní zprávy: minimálně 55 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)
- Seznam odborné literatury: T. Várady, R. R. Martin and J. Cox. Reverse engineering og geometric models an introduction. Computer Aided Design, 1997
Theory and practice on Terrestrial Laser Scanning, 3DRiskMapping 2008
www.3d-skenovani.cz, www.skenovanive3d.cz

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jan Vyčichl, Ph.D.**

Datum zadání diplomové práce: **27. června 2014**
(datum prvního zadání této práce, které musí být nejpozději 10 měsíců před datem prvního předpokládaného odevzdání této práce vyplývajícího ze standardní doby studia)

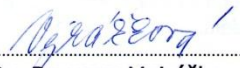
Datum odevzdání diplomové práce: **31. května 2015**
a) datum prvního předpokládaného odevzdání práce vyplývající ze standardní doby studia a z doporučeného časového plánu studia
b) v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývající z doporučeného časového plánu studia


prof. Ing. Ondřej Jiroušek, Ph.D.
vedoucí
Ústavu mechaniky a materiálů


prof. Dr. Ing. Miroslav Svítek
děkan fakulty



Potvrzuji převzetí zadání diplomové práce.


Bc. Romana Vejrážková
jméno a podpis studenta

V Praze dne..... 27. června 2014

Prohlášení:

Tímto předkládám k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr magisterského studia na ČVUT v Praze Fakultě dopravní.

„Prohlašuji, že jsem svoji diplomovou práci vypracovala samostatně, a že jsem uvedla veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o etické přípravě vysokoškolských závěrečných prací.“

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

.....
podpis

Praha, květen 2015

Poděkování:

Na tomto místě bych ráda poděkovala všem, kteří mi nějakým způsobem pomohli k vytvoření této diplomové práce. Bez jejich pomoci by zřejmě nebylo možné tuto práci dokončit v následujícím rozsahu. Poděkování patří především Ing. Janu Vyčichlovi, Ph.D. za odborné vedení a konzultování diplomové práce. Dále bych ráda poděkovala vedení Ústavu soudního znalectví v dopravě K622 a v neposlední řadě svým nejbližším a rodině za morální a materiální podporu, které se mi dostávalo po celou dobu mého studia na Fakultě dopravní.

Abstrakt:

Tato práce se věnuje popisu postupu skenování několika geometricky identických předmětů různých barev a povrchů za pomoci ručního 3D skeneru. Výstupem je tak vytvoření několika 3D modelů v počítači a porovnání postupu skenování a jeho přesnosti. V současné době existuje mnoho druhů snímacích zařízení, které jsou určeny k vytváření duplikátů. Mohou být využívány v různých odvětvích a k různým činnostem, a proto se v této práci vyskytne jejich rozdělení, vlastnosti, princip používání a vzájemné porovnání. Hlavním cílem této práce je porovnání a zhodnocení postupu skenování na základě povrchových vlastností snímaných předmětů.

Abstract:

This thesis focuses on a description of a scanning procedure for geometrically identical objects of different colours and surfaces with the use of a 3D hand scanner. The outcome is then a creation of numerous computerized 3D models and comparison of their scanning procedure and its accuracy. Nowadays, there are many different types of scanning devices which operate for the purpose of duplicates' creation. These scanning devices can be used in various areas and for different tasks, therefore, their division, features, principles of use, and mutual comparison is included in this thesis. The main aim of this thesis is comparison and evaluation of the scanning procedure, based on surface features of the scanned objects.

Obsah:

Prohlášení:.....	i
Poděkování:.....	ii
Abstrakt:.....	iii
1. Úvod.....	1
1.1 Možnosti využití 3D skenerů	2
1.2 Reverse Engineering	3
1.3 3D tisk	3
1.3.1 Historie	4
1.4 3D tiskárna.....	4
2. Principy digitalizace	6
2.1 Mechanické 3D skenery.....	6
2.2 Optické 3D skenery.....	7
2.2.1 Tritop	8
2.2.2 ATOS	9
2.2.3 ATOS CompactScan	10
2.2.4 ATOS Scan Box.....	11
2.2.5 MaxSHOT 3D	11
2.3 Destruktivní 3D skenery	12
2.3.1 RE1000.....	13
2.4 Ultrazvukové 3D skenery.....	13
2.4.1 Freepoint	14
2.5 Rentgenové 3D skenery.....	14
2.6 Laserové 3D skenery.....	15
2.6.1 ScanStation P20.....	16
2.6.2 Creaform 3D Body	17
2.6.3 FARO Focus.....	17
3. Laser.....	19
4. HandyScan 3D	21
4.1 Software	24
4.2 Automatické pozicování	24
4.3 Princip.....	25

4.4	Výhody skeneru Handyscan 3D	26
4.5	Nová generace	26
5.	Tvorba vzorků	28
6.	VXelements	30
6.1	Nastavení	30
6.2	Proces skenování	32
6.3	Další způsoby skenování	34
7.	Vyhodnocení	37
7.1	Catia	37
7.2	SpaceClaim	40
7.3	Precizní model	45
8.	Závěr	48
	Seznam použité literatury:	49
	Seznam použitých obrázků:	51
	Seznam tabulek:	53
	Seznam použitých zkratk:	54

1. Úvod

Skenování je proces převodu grafické informace do elektronické podoby, která je počítačem rozeznatelná. V praktickém životě se skenování většinou používá k převodu obrázků nebo textů do počítače za účelem jejich dalšího zpracování. Každý dokument je nutné ve skeneru nasnímat. Princip 2D skenování spočívá v tom, že je zapotřebí skenovanou předlohu nasvítit po celém jejím povrchu. Dříve tyto skenery fungovaly na principu zářivky. Nevýhodou bylo nerovnoměrné osvětlení předlohy. Nyní se ve skenerech využívá světelných diod, které zaručují rovnoměrné osvětlení dokumentu.

3D skenery dokážou nasnímat trojrozměrný předmět a převést tak realitu do počítače ve formě 3D modelu. Při tomto procesu je nutné mít k dispozici výkonnou výpočetní techniku, jelikož množství přenesených dat pomocí 3D skeneru je značně větší než množství přenesených dat pomocí 2D skeneru.

V dnešní době je již běžné získávat digitální podobu nejrůznějších objektů. Digitální model můžeme vytvořit dvěma způsoby:

- Ve 3D modeléru – Je to softwarová tvorba modelu, která je časově náročnější a digitální model není přesnou kopií reálného objektu.
- Pomocí 3D digitizérů – Jedná se o hardwarovou tvorbu modelu. Ta je mnohem rychlejší a efektivnější než tvorba modelu softwarovým způsobem. Digitální model je přesnou kopií objektu a lze s ním pracovat nebo ho ještě dále upravovat [1].

Vzniklé 3D modely poslouží k názornější představě o snímaném předmětu a také k náročnějším úlohám ve 3D CAD modelování jako jsou výpočty objemů a povrchů nebo vytvoření 2D řezů v libovolném místě předmětu [2].

1.1 Možnosti využití 3D skenerů

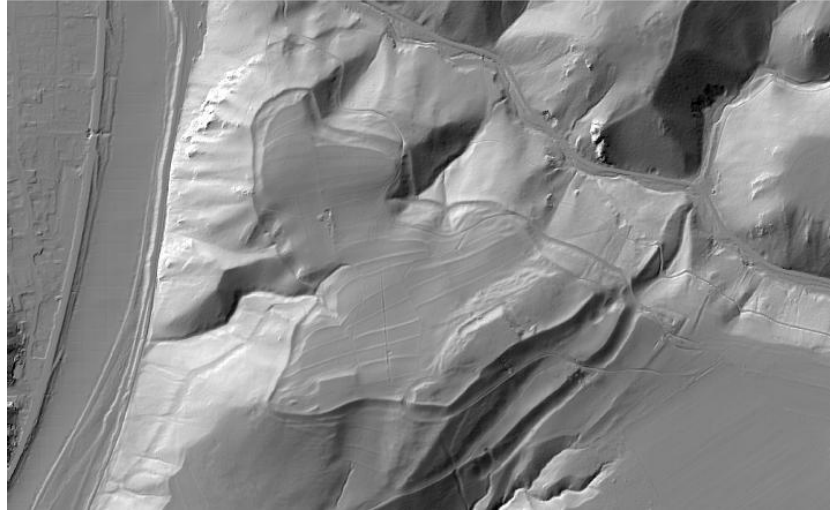
V současnosti nacházejí 3D skenery široké uplatnění v mnoha oborech jako jsou například medicína nebo kosmetický průmysl. V oblasti reklam se 3D skenery využívají pro prezentaci výrobku na internetových stránkách vytvořením vhodné vizualizace. V technické praxi jsou potom využity při měření deformací. A však nejvíce se uplatňují ve strojírenské výrobě. Designéři vytvářejí své návrhy v podobě hliněných modelů, které je nutné převést do CAD aplikací. To je možné s využitím technologie 3D skenerů. S tímto způsobem se nejčastěji setkáme v automobilovém průmyslu, kde se pracuje se složitými křivkami, které nejsou snadno vymodelovatelné. Metody 3D skenování jsou využívány také odborníky z oboru archeologie a muzeologie. Dále jsou 3D skenery používány k vytvoření modelu staré součástky bez výkresové dokumentace [3].

Měření odchylek je dalším důležitým odvětvím, kde se 3D skenery uplatňují. 3D data projdou od původního návrhu po vyrobení součásti několika transformacemi, a proto je důležité konečný výrobek ověřit, zda odpovídá přesnému původnímu návrhu. Proces ověřování se nazývá CAI (Computer - Aided Inspection) a spočívá v naskenování konečného výrobku a následně v porovnání speciálním programem naměřené hodnoty s původním CAD modelem. Pomocí barevného spektra lze zvýraznit odchylky nebo přímo vyčíslit jejich hodnotu [4].

Optické 3D skenery nacházejí uplatnění při analýze tažení plechu. Lze tak analyzovat vibrace v měřeném vzorku. Kmitající laserový paprsek a CCD kamera snímají polohu. Výsledky měření se zobrazí na monitoru počítače. Touto metodou lze odhalovat kritická místa konstrukce nebo vnitřní vady materiálu [3].

Laserové 3D skenování je vhodnou metodou pro zaměřování skutečného stavu složitých technologických celků, jako jsou například průmyslové haly, výrobní linky nebo komplikované potrubní systémy [5].

V leteckém skenování se používá vysokorychlostní světelný dálkoměr s pasivním odrazem, který je schopný pracovat při frekvenci řádově v desítkách kHz. Ze změřeného času vyslání laserového paprsku a jeho vrácení do čidla skeneru, je určena vzdálenost mezi čidlem a měřeným bodem, intenzita odrazu, GPS čas záznamu. U některých lze zaznamenat i echo, nebo - li pořadové číslo odrazu [6].



Obrázek č. 1 – Stínovaný model [30]

1.2 Reverse Engineering

Reverse Engineering neboli česky reverzní inženýrství může být také označováno jako zpětné inženýrství nebo zpětná analýza [7]. Je to proces získání 3D modelu jakéhokoliv fyzického objektu, jehož cílem je odkrýt princip fungování zkoumaného předmětu většinou za účelem sestrojení stejně či podobně fungujícího předmětu. Je možné tak získat informace pro zpětnou tvorbu dílců, od kterých není k dispozici výkresová dokumentace, nebo znovu vytvořit dokumentaci pro díly strojů, jejichž výrobce již zanikl. Výstupem reverzního inženýrství je obnova návrhu nebo dokumentace, které mohou být podkladem pro bezpečnostní audit, vytvoření podobného produktu a podobně [8].

1.3 3D tisk

Proces 3D tisku se také nazývá aditivní výroba. To znamená, že při 3D tisku se vytváří trojrozměrné objekty postupným přidáváním vhodného materiálu, takže nevzniká žádný odpad. Princip spočívá v roztavení nějaké hmoty a ta se pod tlakem postupně nanáší ve velmi tenkých vrstvách na podložku. Vrstvy se vzájemně spojí tavením nebo lepením a následně ztuhnou. Tak vznikne nový 3D objekt [10].

Pomocí 3D tisku je možné vytvářet náročné tvary a konstrukce. Na rozdíl od konvenčních způsobů výroby, jako je na příklad třískové obrábění, při němž je materiál odebírán a vzniká tak i odpad. 3D tisk je vhodný zejména pro kusovou a malosériovou výrobu. Využívá se také pro výrobu prototypů [9].

Materiály vhodné pro 3D tisk jsou na příklad: polyamid, polykarbonát, stříbro, titan, ocel, vosk nebo i cukr a voda. Potom také plast z rostlinné biomasy a Akrylonitril-butadien-styren (ABS), který se používá i pro výrobu lega [10].

1.3.1 Historie

V roce 1986 si vynálezce Charles Hull nechal patentovat technologii stereolitografie. Tato metoda spočívá ve vytváření objektů pomocí postupného vytvrzování polymerů za pomoci UV záření nebo jiných záření různých vlnových délek. Výsledný předmět je vytvářen z vrstev [11]. Charles Hull na konci 90. let založil firmu 3D Systems a vytvořil první zařízení tisknoucí ve 3D formátu pro širokou veřejnost, tzv. stereolitografický aparát SLA-1.

V roce 1993 Massachusettský technologický institut si nechal patentovat technologii trojrozměrných tiskařských technik. Tato metoda využívala práškové materiály a tekuté spojovače. Firma Z Corporation následně koupila licenci k této technologii a na její bázi začala vyrábět 3D tiskárny jako takové.

Počátky technologie 3D tisku tedy spadají do druhé poloviny 20. století, přičemž pojem 3D tiskárna pochází až z druhé poloviny 90. let 20. století [12].

1.4 3D tiskárna

3D tiskárna je zařízení, které vytváří fyzický výrobek. Zdrojem pro jeho tvorbu je virtuální počítačový 3D model, nejčastěji uložený do datového formátu STL. Tisk po vrstvách je řízen ovládací elektronikou na základě virtuální 3D předlohy. Tisková hlava nakreslí vždy jednu vrstvu a potom se posune o kousek výš, kde nakreslí další vrstvu, až vznikne konečný výrobek. V současné době se vývoj těchto zařízení rozděluje na dvě větve. A to větev strojů

pro profesionální a produkční využití a větev levnějších přístrojů pro běžné spotřebitele jako jsou techničtí nadšenci nebo domácí kutilové [13].

2. Principy digitalizace

Prostorová digitalizace je také nazývána trojrozměrná numerizace. Jejím výstupem je soubor 3D bodů, který se nazývá cloud of points nebo jinak mračno bodů. Takový soubor může být generován řadou 3D digitizérů [14].

Základní členění 3D systémů je snímání dat kontaktním nebo bezkontaktním způsobem. Dotykové snímací systémy vyžadují přímý dotyk s povrchem snímaného objektu. Jde o 3D digitizéry a stacionární souřadnicové měřicí systémy CMM (Control Measuring Machine). Do této skupiny patří 3D desktoпы (stolní) nebo systémy pro měření objektů až několik metrů velkých [15]. Bezdotykové systémy zahrnují 3D skenery, které nejčastěji pracují na laserovém nebo optickém principu. Jelikož je snímání 3D souřadnic povrchových bodů mnohem rychlejší, tak se tato zařízení vyznačují značnou produktivitou a jsou schopné vytvořit husté mračno bodů. Všechny výše uvedené typy zařízení jsou vhodné ke snímání vnější geometrie. Existují však i systémy ke snímání vnitřní geometrie. Snímání plochy probíhá bez poškození povrchu.

Další základní rozdělení 3D systémů závisí na tom, zda jde o stacionární (skenovaný objekt se musí dopravit k zařízení) nebo mobilní systém (zařízení je možné přenášet). Přenosná souřadnicová měřicí zařízení jsou velmi mladá. 3D systémy se dále dělí také podle stupně dosahované přesnosti a podle uplatnění na příklad v reklamě, filmu nebo videohráčích.

3D skenery se dají rozdělit na dotykové, optické, laserové, destruktivní, rentgenové a ultrazvukové a to podle způsobů snímání bodů [14].

2.1 Mechanické 3D skenery

Mechanické 3D skenery spadají do skupiny dotykových systémů. Princip tohoto zařízení spočívá ve fyzickém „osahání“ snímaného tělesa hrotem, který je zavěšený na mechanickém rameni (viz. obr. č. 2). V každém kloubu ramene se nachází senzor, který zaznamenává natočení ramene v daném místě. Polohu skenovaného bodu získáme vyhodnocením údajů ze všech kloubů ramene. Před vlastním skenováním je nutné vyznačit body na povrchu skenovaného tělesa. Ty se následně nasnímají a získáme tak přesný digitální obraz. Počet

těchto bodů je závislý na složitosti daného tělesa a na tom, jakou přesnost požadujeme. Výstupem mechanických skenerů je obrovské množství bodů, které jsou definovány třemi souřadnicemi (X, Y, Z). Nevýhodou tohoto zařízení je to, že se nedají získat informace o textuře povrchu a také to, že je nutné těleso "osahávat" hrotem ručně. Z toho důvodu je také tento způsob získávání 3D modelu časově náročný. Mechanické 3D skenery jsou vhodné pro snímání složitějších těles s dutinami i s nerovnoměrným povrchem [15].



Obrázek č. 2 – Microscribe [31]

2.2 Optické 3D skenery

Optické 3D skenery snímají skenované těleso z několika úhlů s využitím optického zařízení, jak již název napovídá. Princip spočívá v tom, že při každém natočení se objekt v podstatě vyfotí a data se odešlou do počítače. Natočení se provádí buď ručně, nebo pomocí polohovacího zařízení (krokový motorek řízený počítačem). Následně se všechna získaná data zpracují a digitalizovaný model se vytvoří metodou aproximace [15].

Většina 3D skenerů vytváří pomocí fotoaparátu a příslušného softwaru počítačové modely sejmutím bodů, polygonů, křivek typu spline nebo jiných geometrických entit [4].

Před vlastním skenováním je vhodné na snímaném tělese vyznačit několik orientačních bodů pro lepší a přesnější spojování obrázků ve 3D těleso. Používají se tzv. centrovací terčiky, jejichž počet může být až několik tisíc, které se umístí na skenované těleso. Je zapotřebí také kalibrační tyč, která je položena vedle snímaného tělesa a zaznamenána na každém snímku. Kvalita modelu se dá především ovlivnit počtem

získaných snímků a výběrem vhodného pozadí, které by mělo být jednobarevné a mělo by kontrastovat se snímaným objektem. Pokud by se tato zásada nedodržela, je potom oddělení objektu od prostředí velmi složité. Tomuto procesu se říká vymaskování.

Optický skener se dá kromě klasického 3D skenování (vytvoření celého objektu) použít jako souřadnicové měřicí zařízení, které najde uplatnění zejména při výrobě strojírenských součástí.

Tato skenovací zařízení mají také své výhody a nevýhody. Výhodou je, že informace o povrchu tělesa je již obsažena ve skenovaných datech. Není tak nutné ji uměle dotvářet. Nevýhoda spočívá v tom, že model je vytvářen aproximační metodou, protože systém nedokáže zreprodukovat prohlubně a díry ze získaných 2D fotografií. Je schopen rozpoznat jen nepatrné náznaky změny hloubky povrchu v kritických místech prohlubní. Optické skenery se dají použít i jako souřadnicová měřicí zařízení, která najdou uplatnění zejména při výrobě strojírenských součástí [15].

2.2.1 Tritop

Tritop je jedním ze systému, které se používají k souřadnicovému měření. Tento systém je mobilní a zahrnuje digitální kameru, notebook, samolepící značky a kalibrační tyč. Nabízí efektivní měření pro aplikace kontroly kvality, deformačních analýz a digitalizace.

Proces měření je založen na principu fotogrammetrie. Před vlastním skenováním se měřený objekt označí speciálními kruhovými značkami, kterých může být až několik tisíc. Takto připravený objekt se poté nasnímá digitálním fotoaparátem z různých stran. Součástí snímků musí být i kalibrační tyč, která se položí vedle snímaného objektu (viz. obr. č. 3). Získané digitální snímky se přenesou z fotoaparátu do počítače a systém Tritop vyhodnotí prostorové souřadnice bodů. Kalibrační tyč slouží k přiřazení správných číselných údajů vzdáleností. Výsledkem je mračno 3D bodů, mezi kterými se dá přesně změřit vzdálenost. Body mohou být exportovány ve standardních formátech nebo použity v systému ATOS.

Tento fotogrammetrický systém je výhodný z hlediska ceny a je rychlejší a přesnější než mechanická měřicí zařízení. Výhodou je také bezkontaktní snímání dat a je možné měřit i tělesa zahřátá na vysokou teplotu, aniž by došlo ke zkreslení výsledků. Jeho přesnost se pohybuje v rozmezí 0,02 až 0,1 mm, to záleží na rozměru součásti. Naměřená data se dají

využít ke kontrole kvality, reverznímu inženýrství nebo k deformační analýze. Tritop se také používá i jako doplňující zařízení k objektu před skenováním zařízením ATOS, v tom případě lze snímat objekty velké až 10 metrů [16].



Obrázek č. 3 – Tritop [4]

2.2.2 ATOS

Jedná se o bezdotykový optický 3D skener, který vytvořila německá firma GOM (Gesellschaft für Optische Messtechnik). Akronymní název Atos vznikl ze slov Advanced Topometric Sensor.

Systém ATOS je flexibilní, mobilní a má vysoké rozlišení (až 90 bodů na 1 mm). Vyznačuje se jednoduchostí ovládání. Lze s ním měřit jakkoliv velké a těžké objekty. Při skenování vzniká vysoká hustota dat a lze pohybovat skenerem i měřeným objektem. Výstupem digitalizace mohou být optimalizovaná polygonální síť (STL), mračno bodů, řezy nebo obrysové a kontrastní křivky. Je využíván ke kontrole kvality, reverznímu inženýrství, přímému obrábění, simulaci tažení plechu a tak dále [17].

Tento optický 3D skener je vhodné použít tam, kde požadujeme vysokou hustotu dat, jelikož jeden snímek obsahuje přibližně 400 000 pixelů. Princip měření je založen na metodě triangulační a na digitálním image processingu. Před vlastním skenováním je nutné na snímáný objekt umístit pomocné značky. Pomocí těchto značek systém vypočte pozici měřících senzorů a změřené hodnoty transformuje do souřadného systému objektu. Součástí zařízení jsou dvě kamery, které z různých úhlů snímají proužky světla promítnuté na povrchu

objektu. Pro každou kameru zvlášť se následně vypočtou 3D souřadnice každého pixelu snímku. Přesnost měření se pohybuje v rozmezí $\pm 0,05$ mm a je srovnatelná s přesností mechanických měřicích přístrojů [16].



Obrázek č. 4 – ATOS [32]

2.2.3 ATOS CompactScan

Dalším typem bezkontaktního systému ATOS je ATOS CompactScan. Tento 3D skener spojuje nmodernější technologii ATOS Blue Light a špičkový software. Technologie Blue Light umožňuje projekci modrého světla přesné měření bez ohledu na světelné podmínky. Díky této technologii je skener schopen měřit oblasti o ploše až 1200 mm². Skenování je rychlé a zachovává vysokou kvalitu měřených dat [18].



Obrázek č. 5 – ATOS Compactscan [18]

2.2.4 ATOS Scan Box

Jedná se o samostatnou mobilní buňku, která vyžaduje jen připojení do elektrické zásuvky a místo o několika málo metrech čtverečních. ATOS Scan Box je vyráběn jako uzavřená buňka, která se dá transportovat na standardních paletách. Tento systém je plně automatizovaným průmyslovým měřícím pracovištěm pro 3D digitalizaci a inspekci. Nabízí celoplošná povrchová měření od malých dílů až po velké, přehlednou prezentaci výsledků, jednoduché vyhledávání problémů a úplný systém protokolů [19].



Obrázek č. 6 – ATOS ScanBox [19]

2.2.5 MaxSHOT 3D

MaxSHOT 3D je optický souřadnicový systém. Jedná se o doplňkový produkt, který přidává fotogrammetrickou přesnost jiným produktům z nabídky Creaform. Je vhodné ho používat pro modely 3 m a větší.

Pracovní postup je velmi jednoduchý. Na objekt se umístí několik značek, vytvoří se série fotografií daného objektu a v programu se provede automatická tvorba modelu pozičních značek, které jsou převedeny do 3D. Kalibrační tyč přidává celému modelu správné měřítko. Jakmile se vytvoří 3D model pozičních značek, můžeme tento soubor použít pro Creaform3D přenosné skenery, nebo pro dotykový CMM skener. Ty pak dále

automaticky používají zachycené poziční značky s vysokou přesností pro své polohování v prostoru [20].



Obrázek č. 7 – MaxSHOT 3D[20]

2.3 Destruktivní 3D skenery

Destruktivní 3D skenery jsou zařízení, která jsou schopna digitalizovat vnější povrch součásti, ale i jeho vnitřní geometrii. Jak název napovídá, digitalizované těleso bude po použití této metody zničeno. Nejčastěji se tohoto způsobu využívá v oblasti reverzního inženýrství při digitalizaci objektů, které mají složitou vnitřní geometrii. Před vlastním procesem digitalizace se skenovaná součást umístí na nastavitelný rám a pokryje se speciálním materiálem, který při následném zpracování naskenovaných snímků poskytne vysoký kontrast mezi součástí a výplňovým materiálem. Poté následuje vyčerpání vzduchu z prostoru a vznikne tak vakuum, které způsobuje to, že se speciální materiál dostane do všech dutin součásti. Tímto způsobem je blok připraven ke skenování a připevní se k frézovacímu stolu. Vlastní skenování probíhá v okamžiku, kdy se z materiálu bloku odfrézuje ultratenká vrstva materiálu. Tím vzniká nový povrch a ten se naskenuje za pomoci optického skeneru. Získaná data jsou dále odeslána k dalšímu softwarovému zpracování [15].

2.3.1 RE1000

Tento systém je vyrobený firmou Caprute Geometry Inside, ve zkratce CGI. Tento systém je schopný digitalizovat součástky do velikosti 30 x 26 x 20 cm. Pro rychlejší proces může také skenovat více součástí najednou, které jsou zality v jednom bloku. Podmínkou je ale stejný materiál součástí. K vyplnění dutin se používá speciální materiál Encase – it. Vhodnými materiály jsou ocel, litina, měď, hliníkové slitiny, plasty, dřevo a další materiály, které se dají obrábět. Součástí systému je upínací mechanismus, pomocí něhož se blok připevní na hliníkovou základnu a poté k frézovacímu stolu. Samotný proces digitalizace je nenáročný na obsluhu, protože stačí zadat tři základní informace a to jsou rozměr bloku, materiál součásti a počáteční výška. Zbytek, jako otáčky vřetene, hloubka řezu, posuv, nastavení stupně šedi, je systém sám schopen automaticky vygenerovat. Doba potřebná k analyzování součásti je 8 až 9 hodin. Záleží na velikosti součásti, počtu vytvořených hladin a na rozlišení skenování. Nasnímaná data se odešlou do počítače k dalšímu zpracování, kdy rekonstrukční software údaje přijme a automaticky uspořádá každou hladinu dat, aby nedošlo ke ztrátě informací.

Následuje další zpracování, tedy Post – Processing, kdy se z 3D bitmapy vytváří body v průsečících materiálu Encase – it a součásti na každé skenované rovině osy Z. Nepotřebné body se odstraní. Výstupní hodnotou je uživatelem definovaný soubor hodnot v ose X, Y, stejně jako v ose skenovaných hladin. Ve srovnání s rentgenovými systémy je RE1000 o 70 % až 80 % levnější, snáze ovladatelný a finální zpracování součásti je přesnější [21].

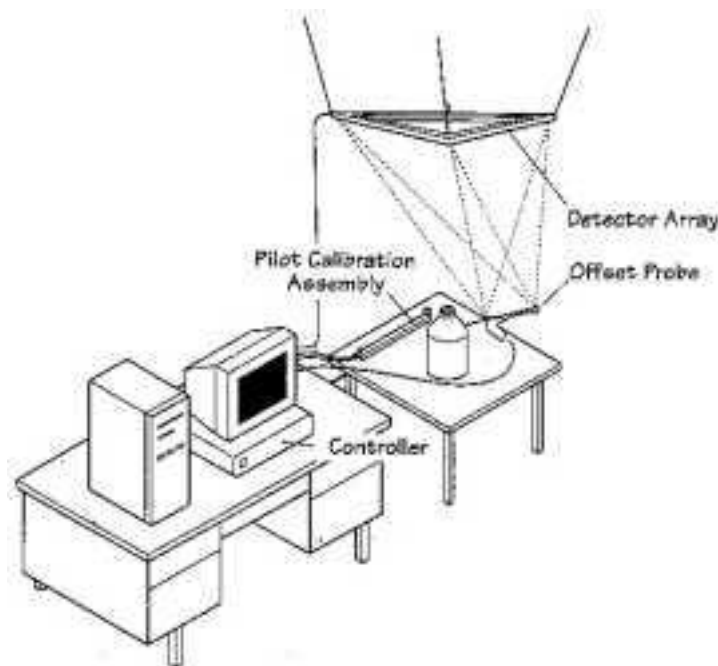
2.4 Ultrazvukové 3D skenery

Tento způsob 3D digitalizace je bezkontaktní a skenování se provádí manuálně. Princip spočívá ve snímání povrchu tělesa pomocí ultrazvukové sondy, která má tvar pistole s kovovým hrotem, který se přiloží ke skenovanému povrchu. Stiskem spouště poté dojde k vyslání signálu, který je pomocí speciální konstrukce s ultrazvukovými čidly dekódován do prostorových souřadnic. Tyto souřadnice je možné vložit přímo do CAD systémů nebo do datových souborů.

Nevýhodou ultrazvukových 3D skenerů je relativně malá přesnost, která se pohybuje v rozmezí 0,3 až 0,5 mm. Výhodou naopak je to, že se jedná o jedno z cenově nejméně náročných způsobů prostorového snímání povrchů [15].

2.4.1 Freepoint

Ultrazvukový 3D skener Freepoint je výrobkem firmy Science Accesories. Jedná se o velmi levnou metodu 3D digitalizace, jelikož tento systém není vybaven vlastním skenovacím softwarovým balíkem. Je vybaven pouze ovladačem. Uplatňuje se především tam, kde není požadovaná vysoká přesnost elektronického modelu. Na příklad u reklamy, filmu nebo animací [22].



Obrázek č. 8 – Freepoint [22]

2.5 Rentgenové 3D skenery

Jak již název napovídá, rentgenové 3D skenery pracují na stejném principu jako klasické rentgeny používané ve zdravotnictví. Rozdílem v používání rentgenového záření je jeho vyšší intenzita. S využitím tohoto typu zařízení lze získat informace o vnitřní geometrii součástí.

Tato metoda digitalizace je nedestruktivní. Tato skenovací zařízení jsou většinou mobilní a používají se např. ke kontrole potrubí, kotlů nebo jiných uzavřených nádob [15].

2.6 Laserové 3D skenery

Laserové 3D skenery pracují podobně jako sonar (což je zvukový zaměřovač) a využívají vlastností laserového paprsku. Příprava před měřením začíná vytvořením bodového pole. Následuje vlastní skenování, které probíhá automaticky bez zásahu lidského faktoru [4].

Princip vlastního skenování spočívá v tom, že kolmo proti skenovanému předmětu se vyšle laserový paprsek, který se od předmětu odrazí a vrátí se zpět do skenovacího zařízení, kde se vyhodnotí. Informaci o rozměru předmětu získáme vyhodnocením časového intervalu, který uplyne od vyslání do vrácení ve směru letu paprsku. Informaci o zakřivení povrchu získáme z úhlu, pod kterým se paprsek vrací zpět do skenovacího zařízení. Tyto dvě základní informace slouží skeneru k získání přesné polohy bodu, kterou odešle do počítače [15]. Tímto způsobem skener "obkrouží" celé těleso nebo skenovací zařízení stojí a těleso se otáčí.

Výstupem je mračno bodů. Toto mračno program zpracovává tak, že odstraní zbytečné body a minimalizují se odchylky. Dále jednotlivé části mračna nahrazuje polygony, které definují geometrii povrchu tělesa. A tak je vytvořen 3D model, který může být importován do CAD systémů. Tyto připravené výstupy je možné využít také jako podklad pro tvorbu hmotových, architektonických modelů [4].

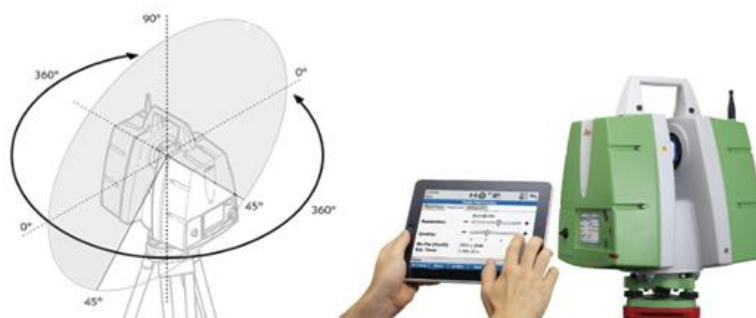
Kvalita výsledného modelu závisí na hustotě, s kterou laserový paprsek pokryl plochu reálného tělesa. Informaci o barvě tělesa snímá barevná kamera, která bývá většinou součástí zařízení. Pracuje na stejném principu jako optické skenery. Díky ní bude výsledný model nejen přesnou geometrickou napodobeninou, ale bude mít i stejnou texturu jako snímaný objekt. Nevýhodou je, že tento druh skenerů má problém s rozpoznáním neprůchozích otvorů, prohlubní a výstupků (na rozdíl od optických skenerů). Dalším mínusem je jejich cena, která je několikanásobně vyšší v porovnání s ostatními uvedenými typy skenovacích zařízení. Výhodou je naopak jejich vysoká přesnost a během procesu skenování jsou nenáročné na obsluhu. Mají nejlepší předpoklady pro široké využití v praxi, protože práce s nimi je snadná a výstupy jsou kvalitní [15].

Ze všech druhů 3D skenování je laserové 3D skenování využíváno nejvíce a to v mnoha oblastech. Jednou z nich je stavebnictví. Je vhodný pro zaměřování skutečného stavu budov, složitých konstrukcí, mostů, podjezdů, hrází nebo pro získání podkladů pro stavbu zaměřením profilu terénu a následným vytvořením 3D modelu. Dobrým pomocníkem je i v případech měření těžko dostupných míst jako jsou kamenolomy, jeskyně, doly a potrubní systémy. Tohoto způsobu převádění reálných těles do trojrozměrných modelů využívají také památkáři při rekonstrukci a dokumentaci památek, ale i tvůrci filmů a počítačových her.

Výstupem je soubor dat o polygonech definujících geometrii povrchu tělesa [4].

2.6.1 ScanStation P20

Německá firma Leica Geosystems vyvinula tento laserový 3D skener, který se řadí mezi ultra rychlé skenery s vysokou úrovní zachyceného detailu. Rychlost skenování je až milion bodů za vteřinu. Vyznačuje se také minimální mírou šumu a jeho dosah je až 120 m. Další vlastností je odolnost vůči okolnímu prostředí, kdy pracovní teplota může dosahovat až -20°C . Většina skenerů má pracovní rozsah začínající na 0°C . Pokud tento skener pracuje na těžko přístupném místě, je možné ho ovládat i na dálku pomocí kontroleru, notebooku nebo iPhoneu. Jeho zorné pole je $360^{\circ} \times 270^{\circ}$. Skener má zabudovaný integrovaný dotykový displej, takže během skenování není nutné připojovat počítač. Tento skener také obsahuje laserovou olovnici, která umožňuje přesnou orientaci na známém bodě. Ke každému měření náleží aktuální hodnoty náklonu skeneru. Pomocí geodetického dvouosého kompenzátoru je každé měření ihned před uložením opraveno. Jeho předchůdci se vyznačují stejnými, ale ne tak kvalitními vlastnostmi [23].



Obrázek č. 9 – ScanStation P2 [23]

2.6.2 Creaform 3D Body

Creaform 3D Body skenery se dokážou přizpůsobit většině povrchů. Digitalizují lidské tělo v plné barvě a přináší realistické výsledky ve 3D. Pomocí této technologie je možné získat velmi realistický model, který je vhodný pro video, hry nebo medicínu [24].



Obrázek č. 10 – Creaform 3D body P2 [24]

2.6.3 FARO Focus

Jedná se o laserový skener, který je vhodný pro rychlé a přesné vnitřní i venkovní měření. Lze s ním snímat na příklad prostředí, budovy, infrastrukturu, architektonické památky, dopravní nehody a forenzní scény.

Existují dva typy a to FARO Focus3D X 130 a FARO Focus3D X 330. Rozdíl mezi nimi je v délce dosahu. Faro Focus3D X 130 dosahuje do délky 130 metrů a Faro Focus3D X 330 až do délky až 330 metrů. Oba modely jsou vybaveny GPS a je možné s nimi pracovat i za jasného slunečního světla.

Na Fakultě dopravní je k dispozici Faro Focus3D X 130 [25].



Obrázek č. 11 – FARO Focus [25]

3. Laser

Slovo laser je akronym z anglického Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, což v překladu znamená: zesilování světla stimulovanou emisí záření. Laser je optický zdroj elektromagnetického záření, který vyzařuje světlo v úzkém svazku paprsků. Na rozdíl od obyčejného světla je laser záření koherentní (což znamená, že má téměř nulovou rozbíhavost) a monochromatické (tedy, že je tvořeno pouze jednou barvou, světlem o stejné vlnové délce). Obyčejné světlo je vyzařováno z různých zdrojů na příklad ze Slunce, otevřeného ohně, žárovky, zářivky, výbojky nebo luminiscenční diody [26].

Lasery našly široké uplatnění v mnoha oborech, jako na příklad ve strojírenství, kde se používají k řezání nebo k povrchovým úpravám kovových součástí. V medicíně jsou využity jako nekrvavé skalpely. Pomocí laserového paprsku se provádí složité operace očí, miniaturní řezy, zastavuje se vnitřní krvácení a léčí se popáleniny. Lasery se také používají v mikroelektronice, měřicí technice, výpočetní technice ale i ve vojenství, vědě a výzkumu. Jeho výhodou je, že můžeme soustředit na malou plochu obrovské množství energie [27].

Princip laseru funguje na základě souboru atomů, které se nachází v excitovaném stavu. Při počáteční reakci jednoho atomu s jedním fotonem je vyvolána stimulovaná emise a tak vzniká další foton. Z toho vyplývá, že jsou k dispozici dva fotony, které mohou vyvolat další dvě stimulované emise. Tímto způsobem roste počet fotonů a proces pokračuje [28].

Některé lasery pracují na určitých vlnových délkách, které naše oko velice dobře vnímá. Laser je koherentní s malým rozptylem laserového paprsku, jak již bylo zmíněno, proto světlo laseru může být soustředěno na malou plochu sítnice. To vede k bodovému přehřátí sítnice a může tak dojít i k trvalému poškození zraku.

Lasery se dle bezpečnosti dělí do čtyř základních tříd:

Třídy bezpečnosti laseru:

- **Třída I**

- Umožňuje trvalý pohled do svazku laserového paprsku bez následků.

- **Třída II**

- Možnost přímého pohledu do zdroje záření. Oko chrání mrkací reflex.

- **Třída III**

- a. Laser má stejné vlastnosti jako u třídy II, ale oko může být poškozeno při pohledu do zdroje za pomoci optické soustavy (na příklad dalekohledu).
- b. Zde již hrozí poškození zraku i při pozorování odrazu. Je tedy nutné používat ochranné pomůcky. Maximální emise záření o výkonu 0,5 W.

- **Třída IV**

- Lasery třídy IV se vyznačují stejnými vlastnostmi jako lasery třídy III b) s tím rozdílem, že emise záření, je větší než 0,5 W.

Lasery, které jsou běžně dostupné, bývají maximálně ve třídě III, což jsou na příklad optické soustavy CD přehrávačů. Výkonné lasery v třídě IV jsou schopné způsobit popáleniny, řezné a tržné rány a dokonce mohou způsobit i požár [26].

4. HandyScan 3D

Firma Creaform byla založena v květnu roku 2002 ve městě Quebec v Kanadě. Tato firma se zabývá výzkumem a vývojem ručního skeneru s názvem HandyScan 3D. Creaform se může pyšnit hned několika svými produkty, kterými přispěla do světa skenování. Jednotlivé typy se liší technickými parametry, na příklad hmotností, rozměry, dosaženou přesností nebo rozlišením dat. Vzájemné porovnání těchto typů je uvedeno v následujících tabulkách a na obrázcích. Řazení je zvoleno dle vzniku jednotlivých typů:

UNIsan™	
Hmotnost	0,98 kg
Rozměry	160 x 260 x 210 mm
Třída bezpečnosti laseru	II
Snímání	18000 snímků/s
Rozlišení	0,1 mm
Přesnost	Až 80 μm
ISO	50 μm + 250 μ/m
Barevné rozlišení	Nemá
Rozlišení textury	Nemá

Tabulka č. 1 - UNIsan™



Obrázek č. 12 – UNIsan [4]

REVscan™	
Hmotnost	0,98 kg
Rozměry	160 x 260 x 210 mm
Třída bezpečnosti laseru	II
Snímání	18000 snímků/s
Rozlišení	0,1 mm
Přesnost	Až 50 μm
ISO	20 μm + 200 μ/m
Barevné rozlišení	Nemá
Rozlišení textury	Nemá

Tabulka č. 2 - REVscan™



Obrázek č. 13 – REVscan [4]

EXAscan™	
Hmotnost	1,25 kg
Rozměry	172 x 260 x 216 mm
Třída bezpečnosti laseru	II
Snímání	18000 snímků/s
Rozlišení	0,05 mm
Přesnost	Až 40 μm
ISO	20 μm + 100 μ/m
Barevné rozlišení	Nemá
Rozlišení textury	Nemá

Tabulka č. 3 - EXAscan™



Obrázek č. 14 – EXAscan [4]

MAXscan™	
Hmotnost	1,27 kg
Rozměry	172 x 260 x 216 mm
Třída bezpečnosti laseru	II
Snímání	18000 snímků/s
Rozlišení	0,1 mm
Přesnost	Až 50 μm
ISO	20 μm + 25 μ/m
Barevné rozlišení	Nemá
Rozlišení textury	Nemá

Tabulka č. 4 - MAXscan™



Obrázek č. 15 – MAXscan [4]

VIUscan™	
Hmotnost	1,3 kg
Rozměry	172 x 260 x 216 mm
Třída bezpečnosti laseru	II
Snímání	18000 snímků/s
Rozlišení	0,1 mm
Přesnost	Až 50 μm
ISO	20 μm + 200 μ/m
Barevné rozlišení	24 bit, sRGB
Rozlišení textury	50 – 200 DPI

Tabulka č. 5 - VIUscan™



Obrázek č. 16 – VIUscan [4]

Na Fakultě dopravní je k dispozici VIUscan™.

V březnu 2005 byl vyroben první prototyp Handyscan 3D. Jak již název napovídá, Handyscan 3D je ruční, laserový, bezkontaktní, samopohovací a přenosný skener. Během snímání umožňuje vzájemný pohyb tělesa a skeneru. V té době to byl první laser s těmito vlastnostmi na trhu. Poté v červnu téhož roku byl poprvé uveden na trh. O rok později v září byl prodán stý skener HandyScan 3D. Rok 2006 se označuje jako narození nové technologie a je považován za první rok skutečného prodeje skeneru.

Byl vyvinut pro potřeby průmyslu, je využíván designéry, ale také pracovníky, kteří se zabývají kontrolou ve výrobě. Velký ohlas zaznamenal především díky svému jednoduchému používání, celkovému výkonu a své přesnosti.

Firma Creaform má hlavní cíl a ten zní: stát se synonymem pro ne-kontaktní laserové snímání a odměřování. Tento ruční skener se v současné době stává světovým leaderem v oblasti laserového snímání.

4.1 Software

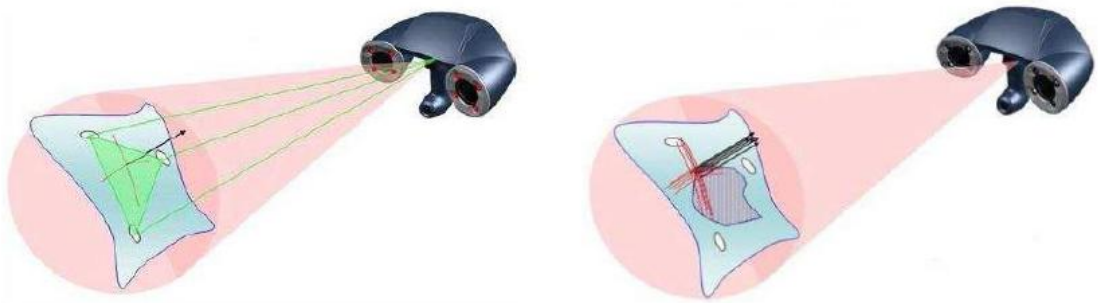
Aplikace VxScan byla vyvinuta přímo pro tento ruční skener a je součástí balení. Aplikace je velmi snadná na naučení i ovládání a je kompatibilní s Microsoft Windows. Software automaticky vytváří přímo z mračna bodů polygonovou síť.

Aplikace VxScan umožňuje výkonné snímání s různým rozlišením. Na příklad ploché a táhlé tvary mohou být snímány s nižším rozlišením, protože nepotřebují tolik detailů a naopak ostré hrany a velké změny tvaru předmětu je nutné skenovat s vyšším rozlišením. Výsledek snímání je možné uložit jako STL soubor, který lze použít k dalšímu zpracování. Dokonce je možné provádět změny sítě, ve specializovaných aplikacích jako jsou na příklad Geomagic nebo RapidForm.

4.2 Automatické pozicování

Jak již bylo zmíněno, Handyscan 3D je první samopohovací skener na světě. Samopohovací znamená, že používá snímané těleso ke stanovení polohy v prostoru. Princip spočívá v tom, že na plochu snímaného tělesa nebo na podložku se umístí reflexní

značky a podle jejich pozice, skener umí vypočítat vzájemnou polohu značek a tak i svou polohu vůči tělesu. Tímto způsobem automaticky naváže polygonovou síť na správném místě (viz obr. č. 17). Poziční značky jsou umístěny náhodně, proto je poloha skeneru vůči této síti značek jedinečná. Tato síť pomáhá určit polohu skeneru podobně, jako GPS používá satelity.



Obrázek č. 17 – Automatické pozicování Handyscanu 3D [29]

4.3 Princip

Handyscan 3D umožňuje vzájemný pohyb skeneru a tělesa během snímání, aniž by hrozilo riziko ztráty informace o umístění snímaného objektu. Tento skener nepotřebuje žádné další technologie nebo zařízení pro určení polohy vůči snímanému objektu a proto není zatížen chybou. Na rozdíl od jiných 3D skenerů, které potřebují na příklad externí sledovací zařízení CMM nebo pohyblivá ramena k určení vlastní polohy nebo polohy snímaného objektu. Je nutné připojit skener do počítače pomocí FireWire kabelu a použít reflexní značky [4].

Skener má v sobě zabudované dvě kamery, které snímají laserový kříž na tělese. Během snímání je na obrazovce počítače vidět obraz snímání v reálném čase.

Díky tomu může uživatel vidět, jakou část má již nasnímanou, a jestli je třeba v některém místě získat více informací. Tradiční skenery tuto schopnost nemají a většinou zobrazují jen neurčitý mrak bodů [29].

4.4 Výhody skeneru Handyscan 3D

Před vlastním skenováním není potřeba skoro žádná příprava. Výstupem je přímo polygonová síť a při opakovaném snímání se data pouze zpřesňují a nedochází ke tvorbě shluku bodů. Během snímání je možné na obrazovce počítače okamžitě vidět nasnímanou polygonovou síť. V porovnání s tradičními skenery, které vyžadují navíc mechanické části nebo pohyblivá ramena, se Handyscan 3D vyznačuje příznivou cenou. Tento skener je vysoce mobilní a díky své hmotnosti, která se pohybuje mezi 1 až 2 kilogramy, je možné ho libovolně přepravovat kamkoliv ve speciálním kufříku. Díky jeho samopolohovací vlastnosti je možné ho využít pro snímání objektů uvnitř ale i venku. Handyscan 3D má schopnost snímat jakékoliv barvy.

Jeho vlastností je také možnost měnit světelnou intenzitu a dobu expozice podle snímaného povrchu. Oba parametry je možné nastavit před začátkem snímání a během samotného procesu je lze kdykoliv upravit. Handyscan je velmi spolehlivý a přesný. Dovoluje snímat vnitřní i vnější část zároveň [4].

4.5 Nová generace

Firma Creaform nezahálí. Díky spokojenosti zákazníků a velké poptávce po přesném 3D skenování, byla vyvinuta nová generace 3D skenerů HandyScan 3D. Jedná se o dva nové typy a to HandySCAN 300TM a HandySCAN 700TM. Jejich technické vlastnosti jsou pro porovnání uvedeny v následující tabulce č.:

	HandySCAN 300™	HandySCAN 700™
Hmotnost	0,85 kg	
Rozměry	122 x 77 x 294 mm	
Třída bezpečnosti laseru	II	
Snímání	205 000 snímků/s	480 000 snímků/s
Rozlišení	0,100 mm	0,050 mm
Přesnost	Až 0,040 mm	Až 0,030 mm
Zdroj světla	3 laserové kříže	7 laserových křížů (+ 1 extra linie)
Doporučená velikost skenovaného objektu	0,1 – 4 m	

Tabulka č. 6 – HandySCAN 300™ a HandySCAN 700™

HandySCAN 700™, jehož použití je vidět na obrázku č. 18, využívá jako zdroj světla 7 laserových paprsků, což znamená, že dosahuje mnohem větší přesnosti než jeho předchůdce HandySCAN 300™, to ho dělá nejlepším ručním skenerem této série.

V porovnání s předchozí generací ručních skenerů jsou oba rozměrově menší, to je pro ně výhodou dostat se snáze do stísněných prostor, a jsou hmotnostně lehčí. Oba také využívají více laserových křížů než jen 1 [33].



Obrázek č. 18 – HandySCAN 700™ [33]

5. Tvorba vzorků

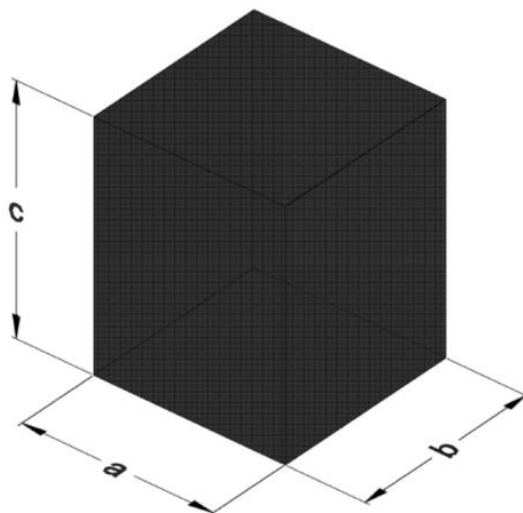
V počítačové aplikaci Catia jsem vytvořila model kvádru, který byl rekonstruován dle následující tabulky:

Vzor	Přední	Pravá	Zadní	Levá	Horní	Spodní	Vzdálenost ploch [mm]
Přední	0	0	80,00	0	0	0	
Pravá	90,00	0	0	80,00	0	0	
Zadní	0	90,00	0	0	0	0	
Levá	90,00	0	90,00	0	0	0	
Horní	90,00	90,00	90,00	90,00	0	100,00	
Spodní	90,00	90,00	90,00	90,00	0	0	

Vzájemný úhel ploch [°]

Tabulka č. 7 – Vzorová tabulka

Model sloužil k vyrobení 3 vzorků, které jsem používala k následnému skenování. Vzorky byly vyrobeny procesem frézování a jsou z materiálu silon PA6. Jelikož byly kvádry podobné, označila jsem je pro svou potřebu čísly 1, 2 a 3. Vzdálenosti stran jsem označila dle následujícího vzoru:



Obrázek č. 19 – Model kvádru

Poté jsem provedla základní přeměření každého z nich pomocí posuvného měřítka a mikrometru. Každou vzdálenost protějších ploch jsem změřila třikrát a naměřené rozměry jsem zapsala do tabulky č.:

	Pořadí měření	Posuvné měřítko			Mikrometr		
		a	b	c	a	b	c
Kvádr č. 1	1	8,024	8,028	10,052	8,034	8,045	/
	2	8,022	8,026	10,072	8,033	8,035	/
	3	8,028	8,028	10,028	8,026	8,026	/
	Průměr hodnot	8,025	8,027	10,051	8,031	8,035	
Kvádr č. 2	1	8,038	8,042	10,042	8,013	8,020	/
	2	8,036	8,042	10,036	8,023	8,027	/
	3	8,036	8,032	10,028	8,014	8,022	/
	Průměr hodnot	8,037	8,039	10,035	8,017	8,023	
Kvádr č. 3	1	8,034	8,036	10,028	8,022	8,033	/
	2	8,036	8,034	10,022	8,021	8,027	/
	3	8,038	8,038	10,032	8,027	8,024	/
	Průměr hodnot	8,036	8,036	10,027	8,023	8,028	

Tabulka č. 8 – Rozměry kvádrů

Funkční rozsah mikrometru, který jsem měla k dispozici, je 100 mm, proto jsem nemohla naměřit vzdálenost „c“ u žádného kvádrů. Z výsledků měření je patrné, že výroba vzorků byla provedena s velice dobrou přesností.

6. VXelements

Celé skenování jsem prováděla za pomoci ručního skeneru HandyScan 3D typu VIUscan™, který spolupracuje s počítačovou aplikací VXelements. Před začátkem skenování jsem musela 3D skener propojit s počítačem několika různými kabelem. Aplikace tak slouží jako komunikátor mezi skenerem a počítačem během procesu skenování. Tento software, ale i samotný skener jsou velmi jednoduché na ovládání.

V aplikaci je velmi snadné se orientovat. Na horním panelu jsou ikonky, které umožňují provádět různé akce. Po levé straně se nachází strom, který obsahuje prvky skenování.

6.1 Nastavení

- Kalibrace

Před začátkem skenování bylo nutné 3D skener nakalibrovat. Kalibrace se provádí za pomoci kalibrační desky, která je přímo určená pro konkrétní skener. Tím jsem zajistila vztah mezi skenerem a prostředím, ve kterém jsem skenování prováděla. Během celého skenování jsem se snažila udržet stejné světelné podmínky v laboratoři.

- Rozlišení:

Dále je třeba nastavit rozlišení, které nalezneme v programu pod názvem Resolution. To můžeme nastavit ručně nebo pomocí předdefinovaných stavů a to buď nízké (Low), střední (Med.) nebo vysoké (High). Jednotlivé druhy rozlišení se liší ve velikosti trojúhelníků, které budou v konečné fázi tvořit síť modelu. Nízké rozlišení se bude vykazovat většími trojúhelníky a model nebude tak přesný. Při vysokém rozlišení bude síť modelu vytvořena malými trojúhelníky a model bude přesnější.

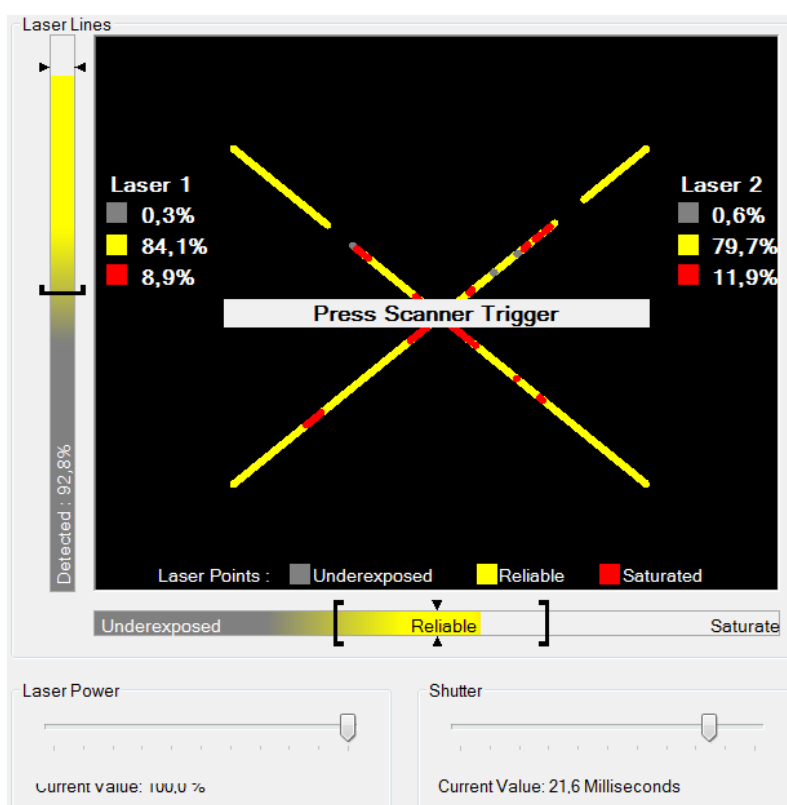
Cílem bylo naskenovat povrch vzorků s co nejvyšší přesností, proto jsem ručně zvolila technickou přesnost přístroje 0,2 mm.

- Konfigurace:

V programu VElements jsem nastavila prostředí pro skenování. Konfigurace spočívá v nalezení vhodného nastavení mezi skenerem a materiálem, ze kterého je snímáný objekt vyroben. Během konfigurace je skener namířen na skenované těleso a samočinně mění svou konfiguraci, než dosáhne zmíněného ideálního nastavení. Konfiguraci lze provést nebo doladit i ručně.

Konfigurace slouží ke zpřesnění spolupráce mezi dvěma paprsky, které skener vysílá. Hodnoty intenzity odraženého paprsku se pohybují mezi 0 – 100 %. Underexposed udává hodnotu při 0 % a to znamená, že paprsky nejsou vystaveny, jsou neaktivní. Tuto hodnotu znázorňuje šedé pole škály. Hodnota při 100 % znamená, že paprsky jsou plně nasyceny = Saturated a tato hodnota se nachází v červeném poli. Pro správnou kalibraci se hodnoty nastavují v poli žlutém, kde hodnoty dosahují 0 % až 100 %. Tato hodnota je tedy spolehlivá = Reliable. Nejlepší je, když oba paprsky přesahují hodnotu 50 %. Správné nastavení konfigurace je vidět na obrázku č. 20.

Ve spodní části tabulky se nachází hodnoty Laser power, která udává sílu laserového paprsku a hodnota Shutter, což je doba závěrky.



Obrázek č. 20 - Správné nastavení konfigurace

6.2 Proces skenování

- Terčíky

Prvním krokem bylo polepení kvádru pomocí reflexních značek, takzvaných terčků. Jelikož má kvádr rovnoběžné stěny a protilehlé stěny jsou stejné, polepila jsem každou jeho stěnu 5 terčků nerovnoměrně (viz. obr. č. 21).

Existuje několik typů terčků. Hlavními jsou Regular (obyčejný) a Black contour (bílý s černým orámováním). Vzhledem k barvě materiálu jsem zvolila terčíky s černým orámováním.



Obrázek č. 21 - Kvádr s terčíky

Dalším krokem při postupu skenování je potřeba naskenovat terčíky a to zvolením ikonky ScanPositioningTargets v aplikaci VElements. Skenování terčků se spustí při stisknutí spouště na samotném 3D skeneru a ukončí puštěním spouště. Na obrazovce v levé části vidíme přesný počet naskenovaných terčků a v hlavní části okna vidíme jejich polohu.

Tím je můžeme jednoduše porovnat se skutečným počtem a polohami terčků na vzorku. Po úspěšném naskenování reflexních značek jsem pokračovala v nasnímání povrchu kvádrů.

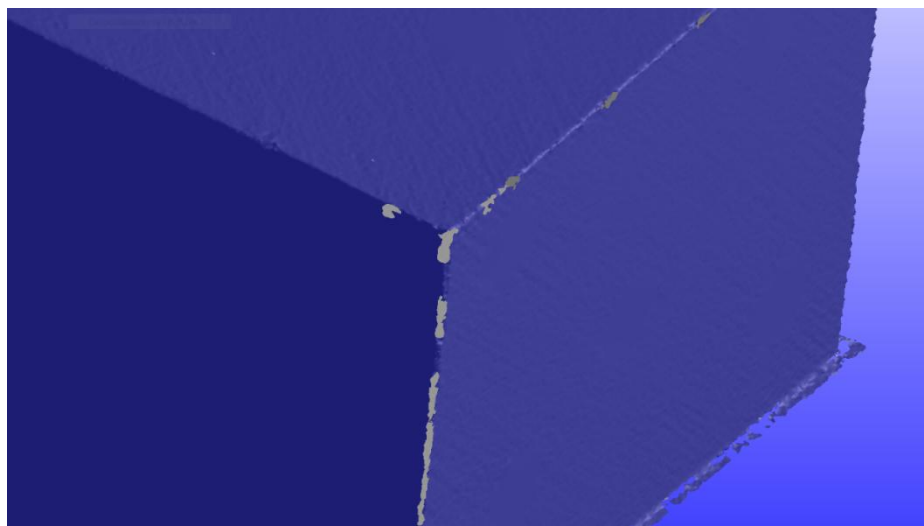
- Povrch

Před skenováním samotného povrchu vzorku jsem provedla konfiguraci vůči danému snímanému povrchu a nastavila intenzitu laserového paprsku. Pro čistý povrch byla nastavena síla laseru 97,8 % a doba závěrky 2 ms.

Pro skenování povrchu je zapotřebí zvolit ikonku ScanSurface. Skenování začne stiskem spouště na 3D skeneru a skončí jejím puštěním. V tomto případě nebylo možné nasnímat povrch, protože laserový paprsek nebyl od materiálu odražen, ale spíše pohlcen. Tím pádem se povrch velice pomalu a špatně skenoval. Zdá se, že materiál, ze kterého byly kvádry vyrobeny, je opticky vodivý. Pro rekonstrukci celkového modelu kvádrů je tento postup nevyhovující.

Přistoupila jsem tedy k možnosti vzorek nakřídovat pomocí speciálního spreje a tím zmatnit jeho povrch. Jelikož by terčiky na křídě dobře nedržely, nakřídovala jsem celý vzorek společně s terčiky a poté je opatrně očistila, aby byly vidět a byly dobře rozpoznatelné pro 3D skener. V tuto chvíli jsem provedla znovu konfiguraci vůči nově upravenému - zmatněnému povrchu a nastavila tak laserový paprsek s nižší intenzitou a to 36 %. Doba závěrky zůstala stejná 2 ms.

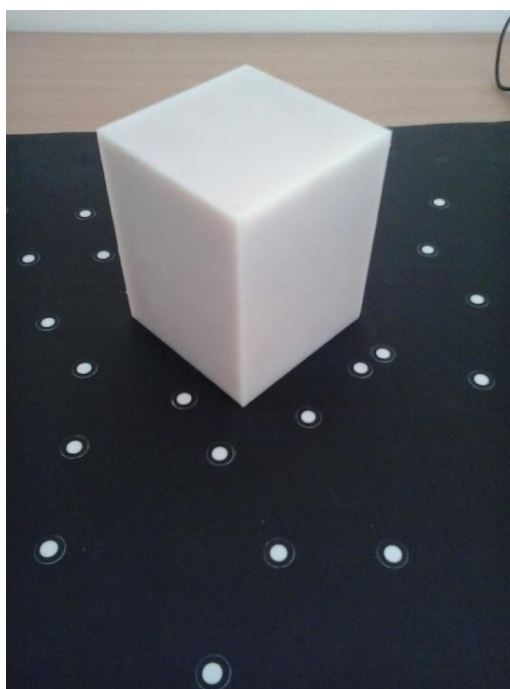
Začala jsem opět nasnímáním terčků a poté zmatněného povrchu. Skenování probíhalo, tak jak má. Největší problém dělaly hrany, které nebyly skenerem dobře zachyceny (viz. obr. č. 22), proto jsem je nakřídovala znovu a pro zpřesnění jsem proces skenování podél hran zopakovala. Během skenování povrchu se vytvořilo několik terčků navíc, které jsem následně odstranila. Tím se v aplikaci přepočítal celý povrch. Tímto způsobem vznikl důvěryhodný model kvádrů, který jsem uložila ve formátu .stl. Tento postup jsem zvolila pouze pro jeden kvádr.



Obrázek č. 22 – Hrany kvádru

6.3 Další způsoby skenování

Dále jsem zkusila jinou možnost, která se zdála být více vhodnější a to, že jsem na polepenou podložku pomocí reflexních značek umístila čistý vzorek. V tomto případě jsem již dále nemohla se vzorkem pohybovat vůči podložce. Nejprve jsem naskenovala terčičky na podložce a poté na ní nastojato umístila těleso a začala se skenováním jeho povrchu (viz. obr. č. 23).



Obrázek č. 23 - Čistý kvádr na podložce

Jelikož snímání probíhalo vzhledem k materiálu vzorku těžko, prioritou bylo nasnímat co největší celistvou plochu na každé stěně kvádrů. Během skenování je na obrazovce počítače vidět stupnice barev (viz. obr. č. 24), podle které se lze řídit a která nám ukazuje, v jaké vzdálenosti se skener od snímaného tělesa nachází. Pokud se stupnice pohybuje v zelené oblasti, znamená to, že skener se nachází v optimální vzdálenosti od tělesa. Horní stěna kvádrů se mi skenovala nejhůře. V případě snímání horní stěny jsem se musela držet naopak v červené oblasti stupnice, aby skenování probíhalo snáze. Vzhledem k tomu, že jsem s tělesem nemohla hýbat, nasníkala jsem pouze 5 stěn (viz. obr. č. 25). Tím jsem získala několik rovin pro další zpracování a vyhodnocování v aplikaci VXELEMENTS. Celý tento postup jsem zopakovala pro každý kvádr zvlášť.



Obrázek č. 24 - Stupnice



Obrázek č. 25 - Naskenované plochy

V dalším kroku jsem všechny 3 kvádry opět nakřídovala a provedla stejný postup skenování, jako s čistými vzorky. Jeden z nakřídovaných kvádrů je vidět na obrázku č. 26. Skenování s nakřídovanými vzorky probíhalo snadněji a rychleji než skenování čistých vzorků. Tím pádem jsem dostala 6 skenů dvou různých povrchů.



Obrázek č. 26 - Křídový kvádr na podložce

7. Vyhodnocení

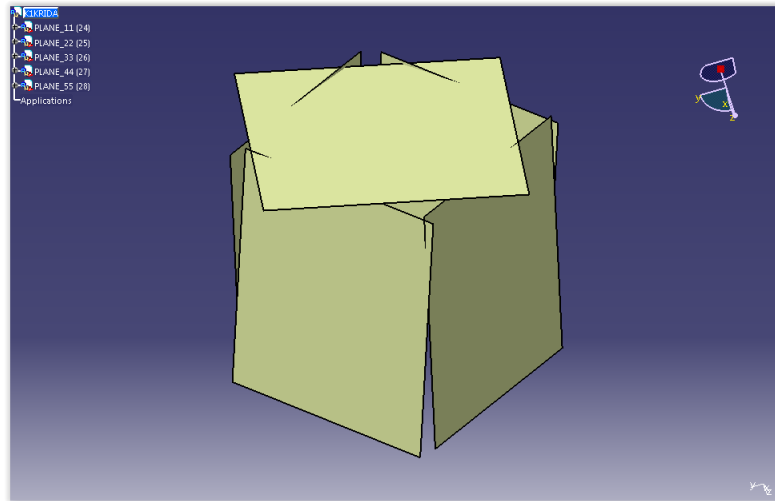
V aplikaci VElements jsem začala s vyhodnocováním rovin. Otevřela jsem každý sken zvlášť a každou naskenovanou stěnu kvádru jsem označila a proložila rovinou. Jelikož nebylo možné s kvádrem vůči podložce hýbat vzhledem ke zvolenému postupu skenování, označila jsem i podložku, abych získala 6 rovin pro každý kvádr. Poté jsem výsledky vyexportovala v několika souborech ve formátu .csv. V každém souboru byly zaznamenány hodnoty souřadnic těžišť jednotlivých rovin a normál ke každému těžišti.

Vyhodnocení z aplikace VElements mi poskytlo dva typy výsledků. Jedním z nich je soubor, v němž se nachází síť elementů, která definuje povrch snímaného předmětu. Tento soubor je uložen ve formátu .stl. Druhým typem výsledku je textový soubor s příponou .csv, který obsahuje souřadnice těžišť a k nim příslušných normál. Z těchto souřadnic je možné získat roviny, které definují povrch snímaného objektu.

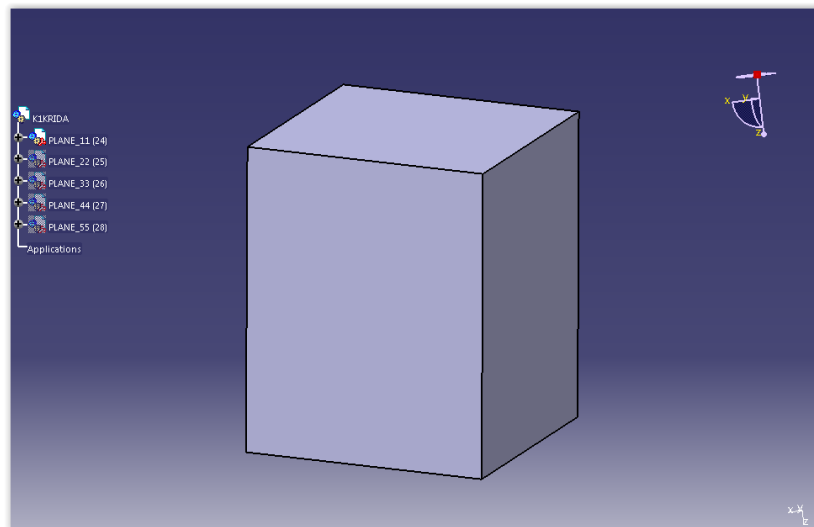
Tyto soubory jsem dále použila ve 2 různých počítačových aplikacích a to SpaceClaim, který je součástí balíčku Ansys, a Catia, kde jsem prováděla další vyhodnocování. Dvě odlišné aplikace jsem zvolila proto, abych měla porovnání. To spočívalo v naměření rozměrů kvádrů – jaká je nejkratší vzdálenost dvou protilehlých rovin a jaké jsou vzájemné úhly mezi rovinami. U modelu se dají zjistit další informace jako je na příklad objem, velikosti ploch nebo hran kvádrů.

7.1 Catia

Do otevřené aplikace Catia jsem postupně nakopírovala všechny souřadnice těžišť s příslušnými normálami. Tím se vytvořilo 6 rovin, které jsou znázorněny na obrázku č. 27. Ty jsem následně ořezala a dostala tak výsledný kvádr (viz. obr. č. 28), na kterém jsem mohla změřit vzdálenosti mezi rovinami a jejich úhly. To jsem opakovala pro každý soubor .csv zvlášť a výsledky měření jsou uvedeny v následujících tabulkách.



Obrázek č. 27 – Roviny



Obrázek č. 28 – Výsledný objem kvádru

1 Čistý	Přední	Pravá	Zadní	Levá	Horní	Spodní	Vzdálenost ploch [mm]
Přední	0	0	79,60	0	0	0	
Pravá	89,95	0	0	79,64	0	0	
Zadní	0,14	89,98	0	0	0	0	
Levá	90,03	0,13	90,04	0	0	0	
Horní	89,84	89,83	90,04	90,05	0	99,83	
Spodní	90,28	90,08	89,84	90,05	0,15	0	

Vzájemný úhel ploch [°]

Tabulka č. 9 – Čistý kvádr č. 1

1 Křída	Přední	Pravá	Zadní	Levá	Horní	Spodní	Vzdálenost ploch [mm]
Přední	0	0	80,10	0	0	0	
Pravá	90,03	0	0	80,14	0	0	
Zadní	0,03	89,98	0	0	0	0	
Levá	89,98	0,01	90,01	0	0	0	
Horní	90,01	89,69	90,01	90,31	0	99,84	
Spodní	89,96	89,87	90,01	90,13	0,45	0	

Vzájemný úhel ploch [°]

Tabulka č. 10 – Křídový kvádr č. 1

2 Čistý	Přední	Pravá	Zadní	Levá	Horní	Spodní	Vzdálenost ploch [mm]
Přední	0	0	79,53	0	0	0	
Pravá	89,96	0	0	79,63	0	0	
Zadní	0,19	90,15	0	0	0	0	
Levá	89,96	0,13	89,94	0	0	0	
Horní	90,08	90,18	89,75	89,92	0	99,89	
Spodní	89,93	89,62	90,23	90,29	0,21	0	

Vzájemný úhel ploch [°]

Tabulka č. 11 - Čistý kvádr č. 2

2 Křída	Přední	Pravá	Zadní	Levá	Horní	Spodní	Vzdálenost ploch [mm]
Přední	0	0	79,84	0	0	0	
Pravá	89,98	0	0	80,00	0	0	
Zadní	0,19	90,05	0	0	0	0	
Levá	89,96	0,10	90,02	0	0	0	
Horní	90,07	90,37	90,12	89,70	0	100,05	
Spodní	89,97	89,57	89,86	90,36	0,07	0	

Vzájemný úhel ploch [°]

Tabulka č. 12 - Křídový kvádr č. 2

3 Čistý	Přední	Pravá	Zadní	Levá	Horní	Spodní	Vzdálenost ploch [mm]
Přední	0	0	79,78	0	0	0	
Pravá	89,99	0	0	79,77	0	0	
Zadní	0,09	90,05	0	0	0	0	
Levá	89,96	0,07	90,00	0	0	0	
Horní	89,99	89,91	89,93	90,14	0	99,82	
Spodní	90,08	89,94	90,00	90,01	0,16	0	

Vzájemný úhel ploch [°]

Tabulka č. 13 - Čistý kvádr č. 3

3 Křída	Přední	Pravá	Zadní	Levá	Horní	Spodní	Vzdálenost ploch [mm]
Přední	0	0	80,10	0	0	0	
Pravá	90,01	0	0	80,08	0	0	
Zadní	0,07	89,98	0	0	0	0	
Levá	89,99	0,03	90,01	0	0	0	
Horní	90,11	90,12	89,96	89,84	0	99,84	
Spodní	89,96	90,06	89,97	89,98	0,19	0	

Vzájemný úhel ploch [°]

Tabulka č. 14 - Křídový kvádr č. 3

Dále jsem porovnávala naměřené hodnoty na modelu v aplikaci Catia s původními hodnotami vzorového modelu kvádrů. Vzorový kvádr má rozměry 80 x 80 x 100 mm a jeho sousední stěny jsou pravoúhlé.

Došla jsem k závěru, že u kvádrů bez povrchové úpravy je největší odchylka vzdálenosti dvou stěn 0,43 mm a největší úhlová odchylka je 0,38°.

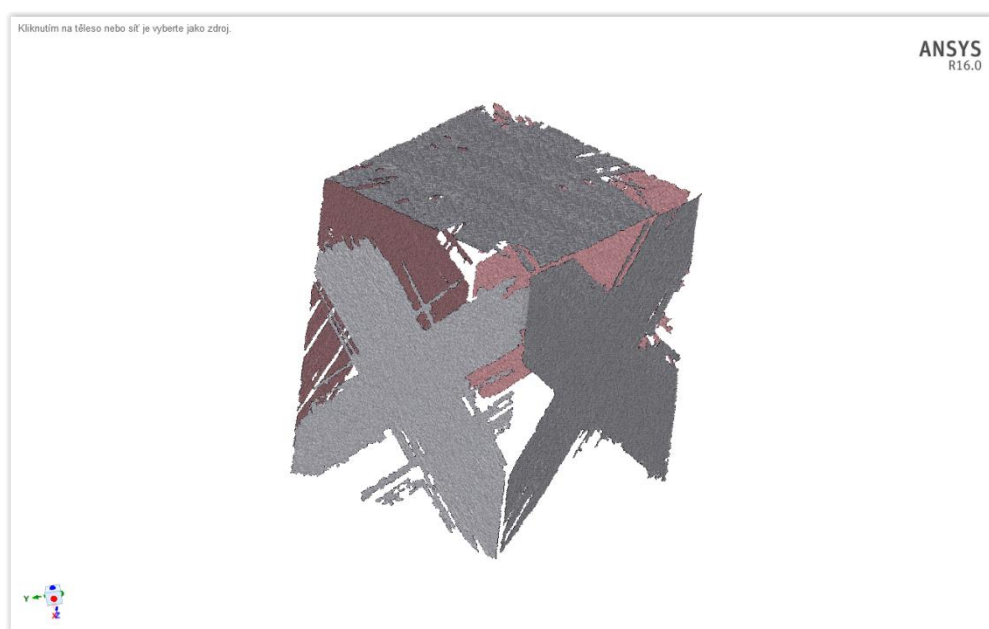
Kvádry s upraveným povrchem pomocí křídly vykazují největší délkovou odchylku 0,16 mm a úhlovou 0,45°.

7.2 SpaceClaim

Soubor s příponou .stl jsem načítala v aplikaci SpaceClaim. K rekonstrukci objemu bylo nutné načtenou síť, která je vidět na obrázcích č. 29 a č. 30 proložit rovinami, které jsem následně ořízla a získala výsledný model kvádrů, na kterém jsem mohla provádět další měření. Tento postup jsem opakovala pro každý soubor uložený ve formátu .stl zvlášť.



Obrázek č. 29 – Síť elementů (čistý kvádr)



Obrázek č. 30 - Síť elementů (nakřídovaný kvádr)

Po získání objemu kvádru jsem pomocí vnitřních funkcí aplikace naměřila nejkratší vzdálenosti mezi rovinami a jejich vzájemné úhly, které jsou shrnuty v tabulkách č. 15 – č. 20.

1 Čistý	Přední	Pravá	Zadní	Levá	Horní	Spodní
Přední	0	0	79,53	0	0	0
Pravá	90,02	0	0	79,47	0	0
Zadní	179,77	90,20	0	0	0	0
Levá	89,91	179,74	89,87	0	0	0
Horní	89,89	89,34	90,06	90,41	0	99,88
Spodní	89,63	89,47	90,32	90,28	0,28	0

Vzájemný úhel ploch [°]

Vzdálenost ploch [mm]

Tabulka č. 15 - Čistý kvádr č. 1

1 Křída	Přední	Pravá	Zadní	Levá	Horní	Spodní
Přední	0	0	80,02	0	0	0
Pravá	89,98	0	0	79,95	0	0
Zadní	179,89	89,96	0	0	0	0
Levá	90,13	179,83	89,93	0	0	0
Horní	90,30	90,10	89,79	89,77	0	99,98
Spodní	89,91	90,15	90,28	89,72	0,49	0

Vzájemný úhel ploch [°]

Vzdálenost ploch [mm]

Tabulka č. 16 - Křídový kvádr č. 1

2 Čistý	Přední	Pravá	Zadní	Levá	Horní	Spodní
Přední	0	0	79,38	0	0	0
Pravá	90,00	0	0	79,52	0	0
Zadní	179,54	89,96	0	0	0	0
Levá	90,21	179,76	89,82	0	0	0
Horní	89,92	90,38	89,62	89,51	0	99,27
Spodní	89,96	90,87	89,58	89,02	0,49	0

Vzájemný úhel ploch [°]

Vzdálenost ploch [mm]

Tabulka č. 17 - Čistý kvádr č. 2

2 Křída	Přední	Pravá	Zadní	Levá	Horní	Spodní
Přední	0	0	80,08	0	0	0
Pravá	89,95	0	0	79,86	0	0
Zadní	179,96	90,01	0	0	0	0
Levá	89,97	179,85	90,07	0	0	0
Horní	89,62	89,99	90,39	89,88	0	99,84
Spodní	89,40	90,13	90,61	89,75	0,25	0

Vzájemný úhel ploch [°]

Vzdálenost ploch [mm]

Tabulka č. 18 - Křídový kvádr č. 2

3 Čistý	Přední	Pravá	Zadní	Levá	Horní	Spodní	Vzdálenost ploch [mm]
Přední	0	0	79,33	0	0	0	
Pravá	89,49	0	0	79,79	0	0	
Zadní	179,46	89,98	0	0	0	0	
Levá	90,41	179,89	90,12	0	0	0	
Horní	90,03	90,30	89,84	89,66	0	99,86	
Spodní	90,17	90,49	89,71	89,47	0,23	0	

Vzájemný úhel ploch [°]

Tabulka č. 19 - Čistý kvádr č. 3

3 Křída	Přední	Pravá	Zadní	Levá	Horní	Spodní	Vzdálenost ploch [mm]
Přední	0	0	80,07	0	0	0	
Pravá	89,96	0	0	80,00	0	0	
Zadní	179,90	90,08	0	0	0	0	
Levá	90,09	179,91	89,88	0	0	0	
Horní	90,15	90,02	89,94	90,06	0	97,65	
Spodní	90,66	91,36	89,44	88,72	1,43	0	

Vzájemný úhel ploch [°]

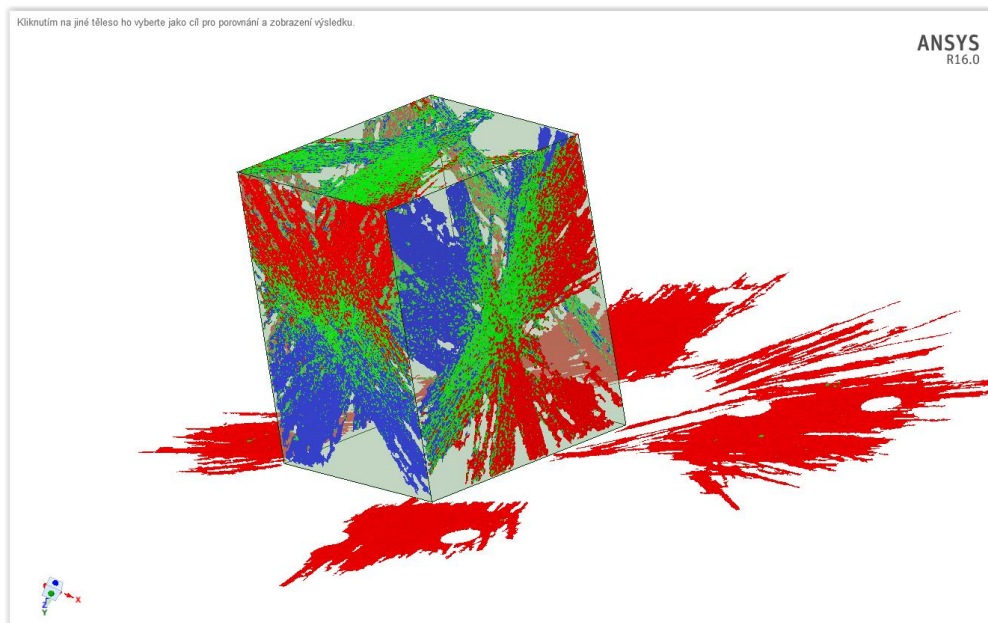
Tabulka č. 20 - Křídový kvádr č. 3

Po zanesení hodnot do tabulek jsem postupovala stejným způsobem jako v Catii a to takovým, že jsem opět porovnávala získané parametry jak pro čisté kvádry, tak pro nakřídované kvádry.

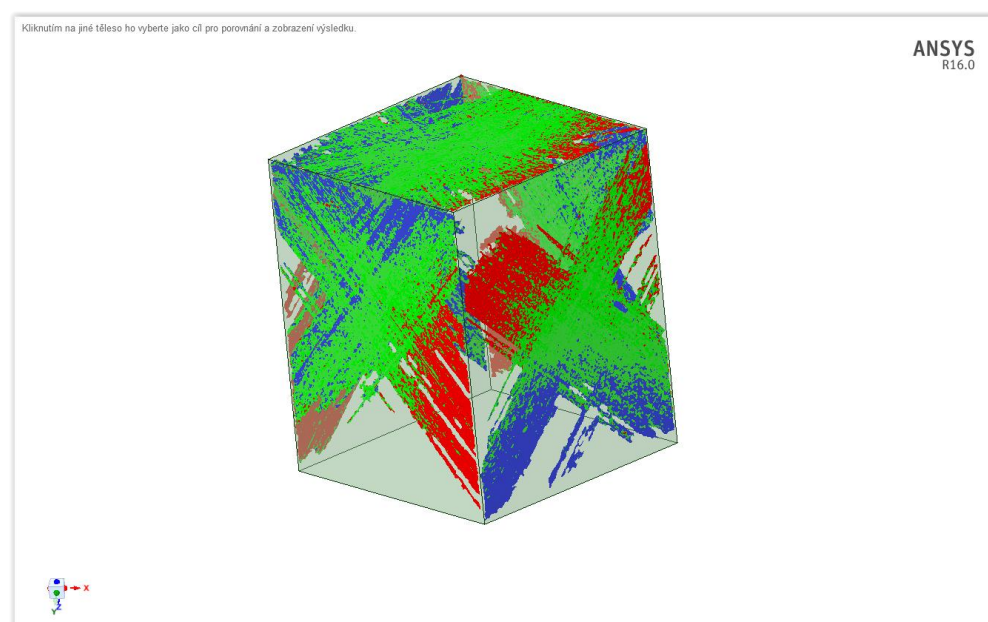
Největší vzdálenostní odchylka u neupravovaných kvádrů je 0,73 mm a úhlová dosahuje 0,98°.

Křídové kvádry vykazují největší odchylku mezi protějšími stěnami 1,43 mm, a co se týče úhlů, je to 2,35°. Takto vysoká hodnota byla způsobena nejspíš nevhodně proloženou spodní rovinou z důvodu nedostatku dat na podložce. Jinak se hodnoty odchylek pohybovaly kolem 0,16 mm a 0,60°.

V aplikaci jsem zvolila zobrazení drsnosti ploch s tolerancí 0,05 mm. Odchylky od roviny byly znázorněny barevným spektrem. Zelená barva znamená, že odchylky povrchu jsou v toleranci. Modrá barva označuje odchylky, které představují vnitřní vzdálenost, a červená naopak vnější vzdálenost. Výsledky jsou vidět na obrázcích č. 31 a č. 32.



Obrázek č. 31 – Odchylky (čistý kvádr)

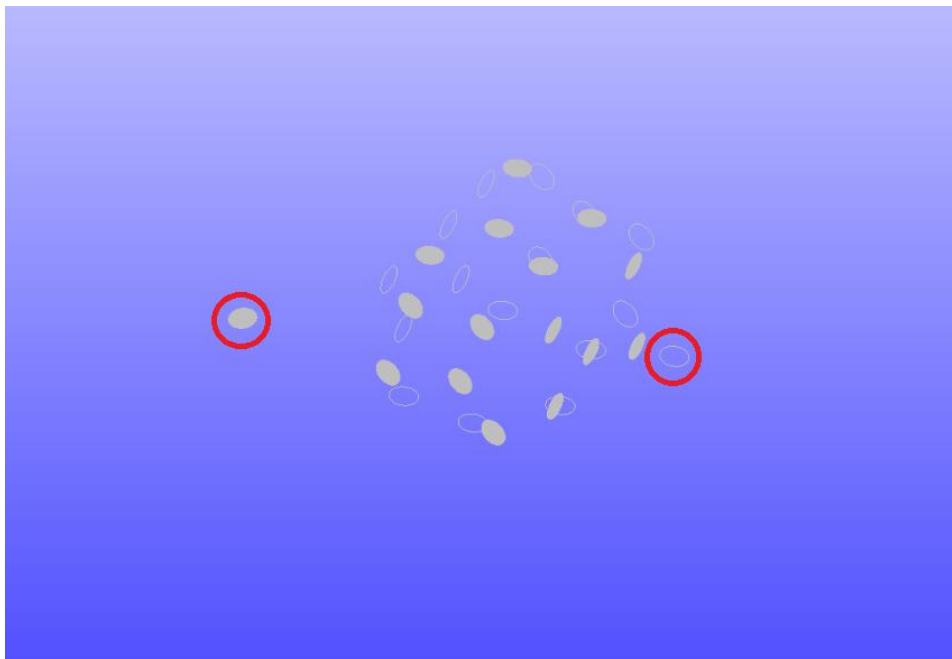


Obrázek č. 32 - Odchylky (nakřídovaný kvádr)

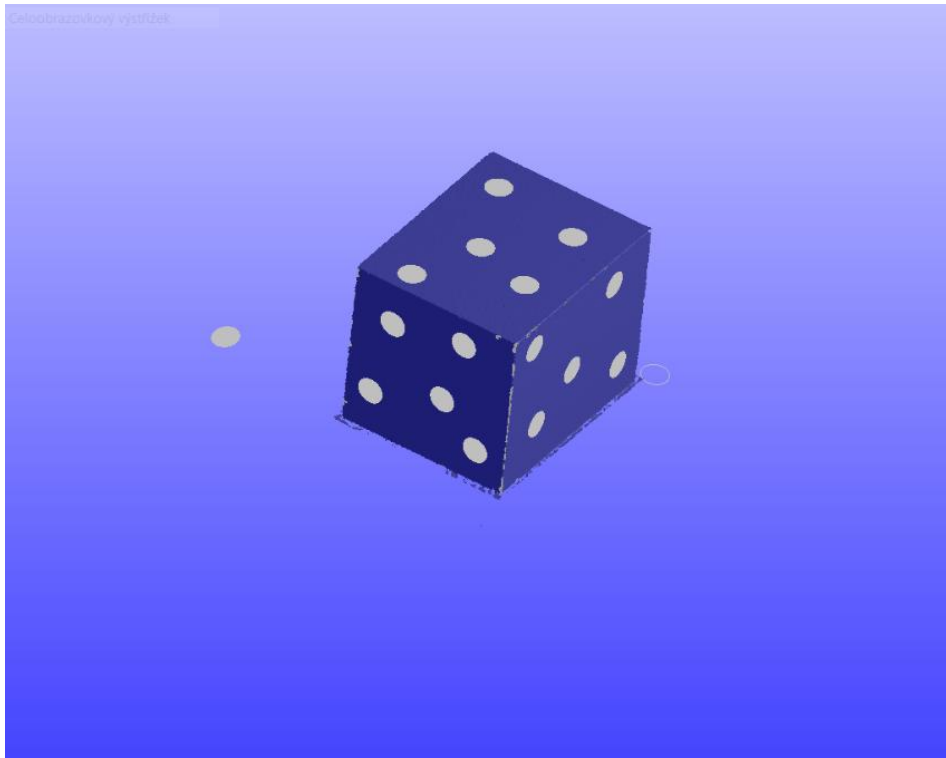
7.3 Precizní model

Postup přenosu fyzického kvádru č. 1, který jsem zvolila při prvotním skenování do virtuálního modelu, je popsán v kapitole 6.2. Výsledek může sloužit jako vzorový příklad 3D skenování s maximálním rozlišením.

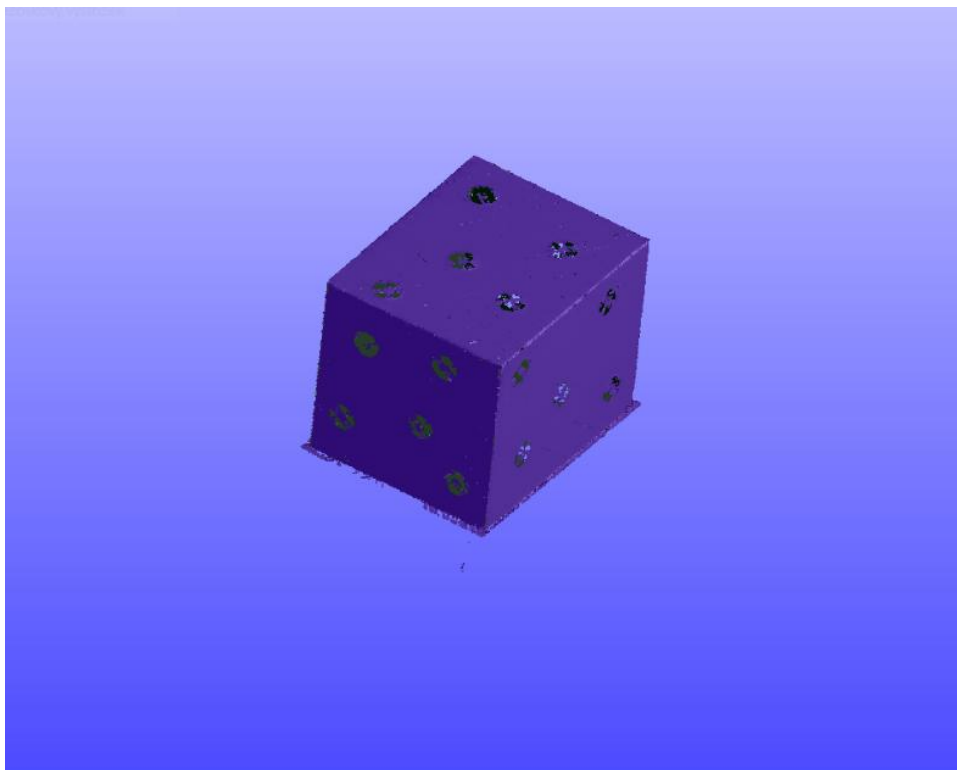
Na základě tohoto skenování jsem získala velice kvalitní povrchovou síť, která může být dále využita při reverzním inženýrství v pokročilých aplikacích pro tvorbu 3D modelu a 3D sítí, jako je na příklad Geomagic. Výsledný model na obrázku č. 36 - pak může sloužit při studiu rekonstrukce hrany a roviny bez využití proložení rovinou.



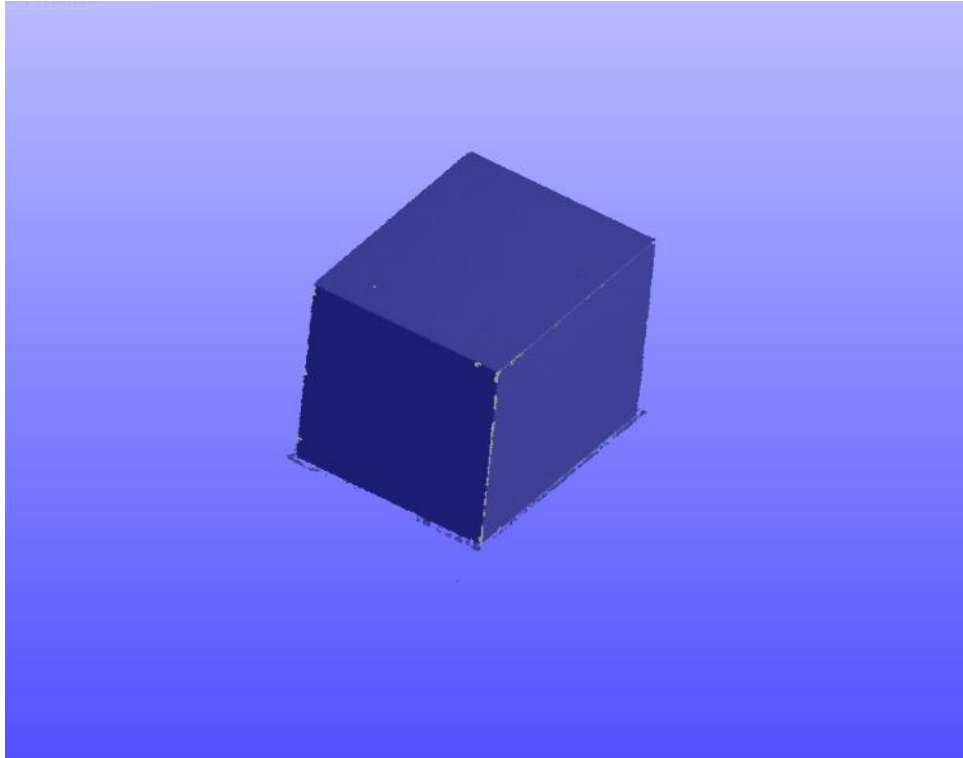
Obrázek č. 33 – Naskenované terčičky



Obrázek č. 34 – Terčíky mimo model



Obrázek č. 35 – Naskenovaný povrch



Obrázek č. 36 – Výsledný model kvádrů

8. Závěr

Zvoleným způsobem přenosu 3 fyzických objektů tvaru kvádrů do virtuálních modelů jsem získala 6 rekonstrukcí, které jsem vyhodnocovala a porovnávala. Pro skenování mi sloužila aplikace VXelements, z které jsem získala síť elementů a textový soubor obsahující souřadnice těžišť a jejich normál. K rekonstrukci modelů na objemy kvádrů jsem tedy využívala dvou různých metod prokládání ploch na základě získané 3D sítě. Rekonstrukci jsem prováděla v počítačových aplikacích Catia a SpaceClaim.

Výsledky, které jsem dostala z měření a porovnání, mohou být zatíženy chybami. Co se týče kvádrů, zde může být chyba ze strany výroby a chyba měření posuvným měřítkem a mikrometrem. Co se týče hodnot v tabulkách, ty mohou být zatíženy chybami výrobními a chybami při skenování a rekonstrukci. Zjištěné odchylky od původního vzorového tvaru kvádrů vyšly lepší z aplikace Catia, software SpaceClaim nebyl v tomto případě tak přesný.

Na základě tohoto vyhodnocování se dá určit jak je 3D skener, s kterým jsem pracovala, přesný.

Během procesu skenování jsem zjistila, že vliv na přesnost má nejen barva a lesklost povrchu, ale i materiálové vlastnosti snímaného předmětu. V tomto případě se projevila světelná vodivost materiálu, která nedovolovala odraz laserového paprsku od povrchu tělesa. Zmíněné vlastnosti materiálu (tělesa) mohou být ovlivněny nástřikem a to buď trvalým, jako jsou na příklad laky, nebo dočasným, jako je na příklad křídový prášek ve spreji. Ten se mi osvědčil, jelikož i s tenkou vrstvou křídového prášku na povrchu objektu, lze dosáhnout kvalitních výsledků. Křída je smývateľná, což může být jak výhoda, tak i nevýhoda. V případě že bychom chtěli těleso vrátit do původního stavu, je křída vhodným nástřikem. Naopak při manipulaci s nakřídovaným předmětem se křída smývá a tím dochází k nedokonalostem na upraveném povrchu.

Seznam použité literatury:

- [1] Úvod do 3D skenování. Dostupné z WWW:
<<http://robo.hyperlink.cz/3dskenery/main02.html>>
- [2] 3D modely. Dostupné z WWW: <http://www.ka.cz/cz/Publikace/2011_10_Laserove_skenovani_text.pdf>
- [3] Využití 3D skenerů. Dostupné z WWW:
<<http://robo.hyperlink.cz/3dskenery/main02.html>>
- [4] Vejrážková, R. Tvorba výpočtového modelu cyklistické přilby pomocí 3D skeneru
- [5] Laserové skenování. Dostupné z WWW: <<http://www.g4d.cz/laserove-skenovani/3d-laserove-skenovani-technologicky-celku>>
- [6] Letecké skenování. Dostupné z WWW: <<http://www.la-ma.cz/?p=88>>
- [7] Reverzní inženýrství. Dostupné z WWW:
<http://cs.wikipedia.org/wiki/Reverzn%C3%AD_in%C5%BEen%C3%BDrstv%C3%AD>
- [8] Reverzní inženýrství. Dostupné z WWW: <<http://www.mepac.cz/cz/presne-strojirenstvi/reverzni-inzenyrstvi>>
- [9] 3D tisk. Dostupné z WWW: <<http://www.3d-tisk.cz/3d-tisk/>>
- [10] 3D tisk. Dostupné z WWW: <<http://3dtiskarna.sh.cvut.cz/cs/o-reprap>>
- [11] Stereolitografie. Dostupné z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Stereolitografie>>
- [12] 3D tisk – historie. Dostupné z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/3D_tisk>
- [13] 3D tiskárna. Dostupné z WWW: <<http://www.3d-tisk.cz/3d-tiskarna/>>
- [14] Digitalizace. Dostupné z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/digitalizace-jeji-princip-a-rozdeleni.html>>
- [15] Principy digitalizace. Dostupné z WWW:
<<http://robo.hyperlink.cz/3dskenery/main03.html>>
- [16] Optické skenery. Dostupné z WWW: <<http://robo.hyperlink.cz/3dskenery/main05.html>>
- [17] Optické skenery. ATOS. Dostupné z WWW: <<http://www.mcae.cz/atos>>
- [18] Optické skenery. ATOS CompactScan. Dostupné z WWW: <<http://www.mcae.cz/atos-compact-scan>>
- [19] Optické skenery. ATOS Scan Box. Dostupné z WWW: <<http://www.mcae.cz/atos-scan-box>>

- [20] Optické skenery. MaxSHOT 3D. Dostupné z WWW: <http://www.3d-skenovani.cz/opticky-skener-maxshot>
- [21] Destruktivní skenery. RE1000. Dostupné z WWW: <http://robo.hyperlink.cz/3dskenery/main07.html>
- [22] Ultrazvukové 3D skenery. Freepoint. Dostupné z WWW: <http://robo.hyperlink.cz/3dskenery/main08.html>
- [23] Laserové 3D skenery. ScanStation P20. Dostupné z WWW: <http://www.gefos-leica.cz/cz/leica/produkty/202/scanstation-p20>
- [24] Laserové 3D skenery. Creaform 3D Body. Dostupné z WWW: <http://www.solidvision.cz/3d-skenery/>
- [25] Laserové 3D skenery. FARO Focus 3D. Dostupné z WWW: <http://www.faro.com/products/3d-surveying/laser-scanner-faro-focus-3d/overview>
- [26] Laser. Dostupné z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Laser>
- [27] Laser. Dostupné z WWW: <http://lasery.wz.cz/index.html>
- [28] Malá, Z.; Nováková, D. a Novák, R. Fyzika II
- [29] Tvorba modelu přilby. Dostupné z WWW: <http://mech.fd.cvut.cz/presentation/other/tvorba-modelu-prilby-z-3d-skenovani?searchterm=3d+skeno>
- [30] Letecké skenování. Dostupné z WWW: http://www.gis.zcu.cz/projekty/Geomatika_multimedialne/FGM/fgm-lls-principy.pdf
- [31] Microscribe. Dostupné z WWW: <http://www.3d-microscribe.com/MX%20and%20G2%20Intro%20Page.htm>
- [32] ATOS. Dostupné z WWW: <http://www.technodat.cz/3d-opticke-skenovani-jako-soucast-technologie-rapid-prototyping-ve-spolecnosti-evektor>
- [33] HandySCAN 3D. Dostupné z WWW: <http://www.3d-skenovani.cz/handyscan-3d>

Seznam použitých obrázků:

Obrázek č. 1 – Stínovaný model [30]	3
Obrázek č. 2 – Microscribe [31]	7
Obrázek č. 3 – Tritop [4]	9
Obrázek č. 4 – ATOS [32].....	10
Obrázek č. 5 – ATOS Compactscan [18]	10
Obrázek č. 6 – ATOS Scan Box [19]	11
Obrázek č. 7 – MAXSHOT 3D [20]	12
Obrázek č. 8 – Freepoint [22]	14
Obrázek č. 9 – ScanStation P2 [23]	16
Obrázek č. 10 – Creaform 3D body [24]	17
Obrázek č. 11 – FARO Focus [25]	18
Obrázek č. 12 – UNIScan [4]	21
Obrázek č. 13 – REVscan [4].....	22
Obrázek č. 14 – EXAScan [4]	22
Obrázek č. 15 – MAXscan [4]	23
Obrázek č. 16 – VIUScan [4]	23
Obrázek č. 17 – Automatické pozicováníHandyscanu 3D [29]	25
Obrázek č. 18 – HandySCAN 700 TM [33].....	27
Obrázek č. 19 – Model kvádru	28
Obrázek č. 20 – Správné nastavení konfigurace	31
Obrázek č. 21 – Kvádr s terčíky	32
Obrázek č. 22 – Hrany kvádru	34
Obrázek č. 23 – Čistý kvádr na podložce.....	34
Obrázek č. 24 – Stupnice.....	35
Obrázek č. 25 – Naskenované plochy	35
Obrázek č. 26 – Křídový kvádr na podložce	36
Obrázek č. 27 – Roviny.....	38
Obrázek č. 28 – Výsledný objem kvádru	38
Obrázek č. 29 – Síť elementů (čistý kvádr)	41
Obrázek č. 30 – Síť elementů (nakřídovaný kvádr).....	41

Obrázek č. 31 – Odchylky (čistý kvádr)	44
Obrázek č. 32 – Odchylky (nakřídovaný kvádr).....	44
Obrázek č. 33 – Naskenované terčíky	45
Obrázek č. 34 – Terčíky mimo model.....	46
Obrázek č. 35 – Naskenovaný povrch.....	46
Obrázek č. 36 – Výsledný model kvádru	47

Seznam tabulek:

Tabulka č. 1 – UNIScan™	21
Tabulka č. 2 – REVscan™	22
Tabulka č. 3 – EXAScan™	22
Tabulka č. 4 – MAXscan™	23
Tabulka č. 5 – VIUScan™	23
Tabulka č. 6 – HandySCAN 300™ a HandySCAN 700™	27
Tabulka č. 7 – Vzorová tabulka	28
Tabulka č. 8 – Rozměry kvádrů	29
Tabulka č. 9 – Čistý kvádr č. 1	38
Tabulka č. 10 – Křídový kvádr č. 1.....	39
Tabulka č. 11 – Čistý kvádr č. 2	39
Tabulka č. 12 – Křídový kvádr č. 2.....	39
Tabulka č. 13 – Čistý kvádr č. 3	39
Tabulka č. 14 – Křídový kvádr č. 3.....	40
Tabulka č. 15 – Čistý kvádr č. 1	42
Tabulka č. 16 – Křídový kvádr č. 1.....	42
Tabulka č. 17 – Čistý kvádr č. 2	42
Tabulka č. 18 – Křídový kvádr č. 2.....	42
Tabulka č. 19 – Čistý kvádr č. 3	43
Tabulka č. 20 – Křídový kvádr č. 3.....	43

Seznam použitých zkratk:

2D	dvourozměrný
3D	trojrozměrný
CAI	ComputerAidedInspection - proces ověřování
CAD	ComputerAided Design - počítačem podporované projektování
CD	Compact Disc - kompaktní disk
CMM	ControlMeasuringMachine - stacionární měřicí souřadnicový systém
CSV	Comma separated values – datový formát
ČVUT FD	České vysoké učení technické v Praze, Fakulta dopravní
DPI	Dots Per Inch - údaj určující, kolik obrazových bodů (pixelů) se vejde do délky jednoho palce
sRGB	standardní RGB barevný prostor (Red Green Blue, červená zelená modrá)
STL	Stereolithographya - datový formát