

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ
V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

TECHNOLOGIE VÝROBY KOPIE OSOBNÍHO AUTOMOBILU POMOCÍ DIGITALIZACE MANUFACTURING TECHNOLOGY OF A CAR COPY BY DIGITIZING METHOD

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE : Bc. Jiří Eis
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE: Ing. Josef Sedlák, Ph.D.
SUPERVISOR

BRNO 2010

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2009/2010

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Jiří Eis

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Strojírenská technologie (2303T002)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Technologie výroby kopie osobního automobilu pomocí digitalizace

v anglickém jazyce:

Manufacturing technology of a car copy by digitizing method

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

1. Úvod
2. Popis a použití technologie reverzního inženýrství
3. Současně používané aditivní technologie rapid prototyping
4. Experimentální část
5. Verifikace modelu metodou FDM
6. Závěr

Cíle diplomové práce:

Cílem diplomové práce je získání modelu osobního automobilu pomocí technologie reverzního inženýrství, včetně jeho úpravy a zpracování získaných dat. Dalším krokem bude výroba modelu aditivní technologií rapid prototyping a konečná verifikace odchylek kopie a originálu automobilu.

Seznam odborné literatury:

1. VLÁČILOVÁ, H., VILÍMKOVÁ, M., HENCL, L. Základy práce v CAD systému SolidWorks. 1. vyd. Brno: Computer Press, a.s., 2006. 319 s. ISBN 80-251-1314-0.
2. JACOBSON, D. M., RENNIE, A. E. W., BOCKING C. E. In Proceedings of the 5th National Conference on Rapid Design, Prototyping, and Manufacture. Professional Engineering Publishing, 2004, pp.112. ISBN 1860584659.
3. PÍŠA, Z., KEJDA, P., GÁLOVÁ, D. Rapid Prototyping in Mechanical Engineering. In Proceedings of the Abstracts 12th International Scientific Conference CO-MA-TECH 2004. Bratislava: STU, 2004. s. 160. ISBN 80-227-2121-2.
4. ZOUHAR, J., PÍŠA, Z., SEDLÁK, J., SEDLÁČEK, J. Produktivní obrábění s využitím metod reverzního inženýrství. In Sborník odborné konference „Frézování IV“. Brno: VUT-FSI, Ústav strojírenské technologie ve spolupráci s PRAMET TOOLS, s.r.o. Šumperk a ZPS - Frézovací nástroje, a.s., Zlín, 31.1.2007. s. 189-196. ISBN 80-214-3239-X.
5. PÍŠA, Z. Komplexní grafické pracoviště. it CAD, 2004, č.3, s. 42-44. ISSN 0862-996X.
6. GOM mbH. Germany: Industry 3D measuring techniques – for digitizing and deformation measurement [online]. Květen 2005. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.gom.com>>.
7. Navrátil, R.: Reverse Engineering v praxi [online]. Červen 2000. Dostupné na World Wide Web: <<http://robo.hyperlink.cz/re-praxe/index.html>>.
8. NAVRÁTIL R. 3D skenery. [online]. Leden 2000. [cit. 26. srpna 2009]. Dostupné na World Wide Web: <<http://robo.hyperlink.cz/3dskenery/index.html>>.
9. PÍŠA, Z., PUTZOVÁ, I. Reverse Engineering methods in the machine design. In Low Voltage Electrical Machines 2006. Brno: FEED BUT, 14.11.2006-15.11.2006. s. 292. ISBN 80-214-3159-8.
10. MCAE Systems s.r.o. Česká republika. FDM TECHNOLOGIE pro rychlou výrobu modelů, prototypů a forem. [online]. [cit. 26. srpna 2009]. Dostupné na World Wide Web:<<http://www.mcae.cz/iecz.html>>.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Josef Sedlák, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2009/2010.

V Brně, dne 18.11.2009

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato práce, vypracovaná jako diplomový projekt na VUT v Brně, v teoretické části shrnuje nejpoužívanější metody, technologii reverzního inženýrství a rapid prototyping, včetně jejich využití v praxi.

Experimentální část práce se zabývá aplikací těchto technologií na praktickém příkladu. Cílem práce bylo získání digitalizovaného modelu automobilu pomocí optického skeneru ATOS a fotogrametrického systému TRITOP, včetně úpravy a zpracování získaných dat, která budou dále použita k verifikaci modelu metodou FDM.

Klíčová slova

Reverzní inženýrství, rapid prototyping, digitalizace, automobil, CAD, FDM.

ABSTRACT

This thesis, made as diploma project at VUT Brno, summarize in teoretical part most used methods, technology of reverse engineering and rapid prototyping, including their using in practice.

Experimental part discussed about aplication of this technologies on practical example. Tendency of thesis was creation of digitized model of a car by optical scanner ATOS and photogrammetry system TRITOP, including modifications and processing of get data, which will use to verification of model by FDM technology.

Key words

Reverse engineering, rapid prototyping, digitizing, a car, CAD, FDM.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

EIS, Jiří. *Název: Technologie výroby kopie osobního automobilu pomocí digitalizace*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojího inženýrství, 2010. s. 87. Vedoucí práce: Ing. Josef Sedlák, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma *Technologie výroby kopie osobního automobilu pomocí digitalizace* vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

V Brně dne 26.5.2010

.....

Bc. Jiří Eis

Poděkování

Děkuji tímto Ing. Josefu Sedlákov, Ph.D. za cenné rady, připomínky a příkladné vedení diplomové práce. Za poskytnutá zařízení a pomoc při zpracování dat patří poděkování firmě MCAE SYSTEMS, s.r.o., zejména pak pánům Ing. Ambrósi Bothovi a Ing. Janu Zouharovi. Rovněž děkuji několika studentům za nezištnou pomoc při realizaci experimentu. V neposlední řadě také děkuji svým rodičům za podporu během celého studia a nejen při něm.

OBSAH

Abstrakt	3
Prohlášení.....	4
Poděkování.....	5
Obsah	6
Úvod	8
1 Popis a použití metod reverzního inženýrství	9
1.1 Podstata metody reverzního inženýrství	10
1.2 Nástroje reverzního inženýrství	10
1.3 Rozdělení 3D skenerů.....	11
1.3.1 Destruktivní skenery	12
1.3.2 Bezdotykové skenery	12
1.3.2.1 Optické skenery	12
1.3.2.2 Laserové skenery	18
1.3.2.3 Ultrazvukové skenery	20
1.3.2.4 Rentgenové skenery	21
1.3.3 Dotykové skenery.....	21
1.3.3.1 Měřicí ramena.....	21
1.3.3.2 Adaptace CNC stroje	22
1.3.3.3 Souřadnicové měřicí systémy CMM	23
1.4 Aplikace technologií reverzního inženýrství	24
2 Aditivní technologie rapid prototyping	26
2.1 Obecný princip metod RP.....	26
2.2 Data pro tvorbu modelu	27
2.3 Zařízení na výrobu prototypů	28
2.3.1 Stereolitografie - SLA	29
2.3.2 Solid Ground Curing - SGC	31
2.3.3 Selective Laser Sintering - SLS	33
2.3.4 Direct Metal Laser Sintering - DMLS	36
2.3.5 Laminated Object Manufacturing - LOM.....	39
2.3.6 Fused Deposition Modeling - FDM.....	40

2.3.7 Multi Jet Modeling - MJM	42
2.3.8 Další metody Rapid Prototyping	43
3 Experimentální část	47
3.1 Měření systémem ATOS	47
3.1.1 Popis systému ATOS II 400	47
3.1.2 Příprava ke skenování	49
3.1.3 Vlastní měření	56
3.2 Měření systémem TRITOP	57
3.2.1 Popis systému TRITOP	58
3.2.2 Příprava ke skenování	59
3.2.3 Vlastní měření	60
3.3 Zpracování získaných dat	62
3.4 Další úpravy modelu	67
4 Verifikace modelu metodou FDM	71
4.1 Popis 3D tiskárny Dimensions uPrint	71
4.2 Práce s obslužným softwarem CatalystEX	72
4.3 Návrh variant řešení	74
4.4 Realizace	77
Závěr	79
Seznam použitých zdrojů	81
Seznam použitých zkratk a symbolů	85

ÚVOD

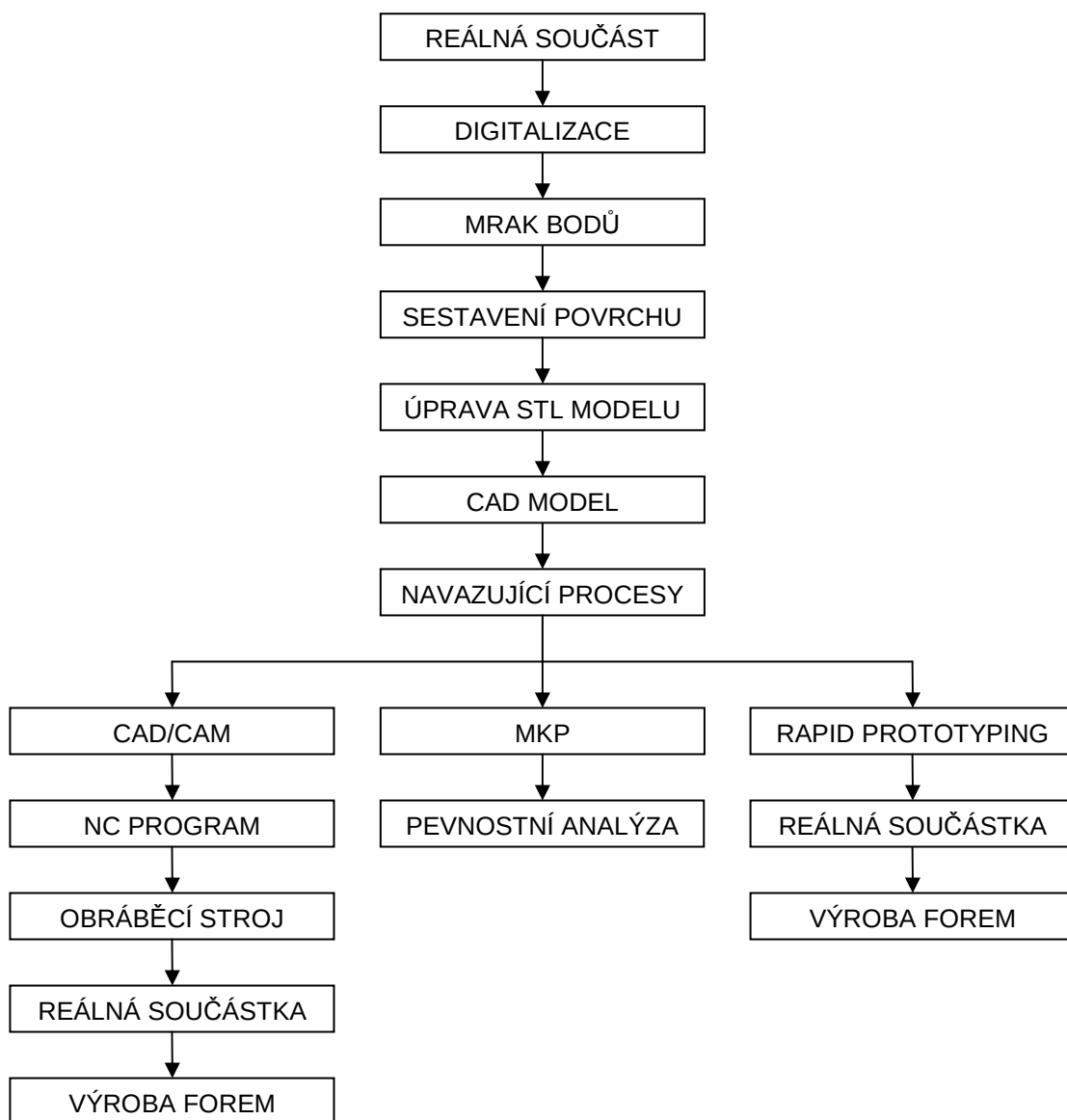
Moderní výrobní proces součásti zpravidla začíná tvorbou modelu v CAD programu, poté je navržen výrobní postup a nakonec je součást vyrobena na CNC stroji. V praxi však mohou nastat i případy při nichž je nutné z reálné součásti zpětně získat digitalizovaná data. Právě to umožňují různé metody reverzního inženýrství. Jedná se o stále více využívanou technologii, bez které si nelze práci v některých odvětvích již vůbec představit.

Jestliže cílem metod reverzního inženýrství je získat z reálné součásti digitalizovaný model, pak pod pojmem rapid prototyping označujeme naopak vytvoření reálného modelu z počítačových dat. Jedná se o tzv. aditivní technologii, kde se na rozdíl od technologií subtraktivních (např. obrábění) materiál neodebírá, ale naopak přidává. Existuje celá řada metod, které byly vyvíjeny zejména s cílem snížit náklady a zefektivnit proces vývoje nového výrobku. Moderní metody dokonce umožňují i přímou výrobu funkčních součástí. Mimo výroby prototypů se jich využívá i v malosériové výrobě nebo v případech, kdy není možné součást vyrobit běžnými technologiemi např. kvůli složité vnitřní geometrii. Technologie RP nacházejí uplatnění nejen ve strojírenství, ale i v oblasti průmyslového designu, lékařství, architektury apod.

V experimentální části práce bude s využitím těchto dvou moderních technologií vyrobena zmenšená kopie automobilu. Nejprve bude nutné převést reálné tvary automobilu pomocí 3D skeneru na počítačová data. Tato data zpracovat a upravit tak, aby mohly být využity k aplikaci technologie rapid prototyping na 3D tiskárně FDM.

1 POPIS A POUŽITÍ METOD REVERZNÍHO INŽENÝRSTVÍ

V současné době se v průmyslové praxi stále častěji setkáváme s pojmy jako je reverzní inženýrství (reverse engineering), nebo 3D digitalizace. Technologie reverzního inženýrství je moderní technologie, která umožňuje převést tvary a rozměry reálného objektu na počítačová data a ty pak dále využít v procesu výroby. Díky této metodě lze změřit součást v kratším čase, než by to bylo možné při použití konvenčních metod. Se vzrůstající složitostí výrobku je použití této technologie výhodnější. Získaná data je možné dále využívat v navazujících aplikacích (viz. obr 1.1).

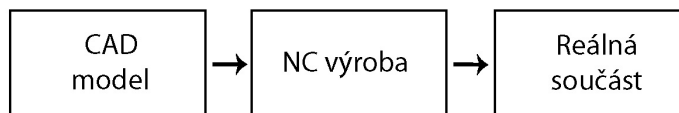


Obr. 1.1 Vývoj a proces vzniku reálné součásti (podle²⁹).

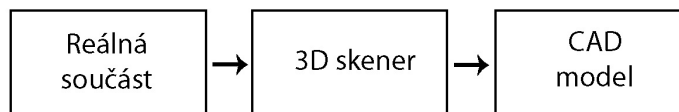
1.1 Podstata metody reverzního inženýrství

V běžném procesu moderní výroby konstruktér na základě podkladů navrhuje virtuální model součásti v některém z CAD programů, poté je součásti navržen výrobní postup a součást je vyrobena. Reverzní (nebo-li zpětné) inženýrství umožňuje, aby na počátku stál fyzický objekt, který je po digitalizaci převeden do podoby modelových dat. Digitalizace je fáze převodu z reálné součásti na virtuální model. V praxi se nejčastěji používají polygonální, plošné nebo objemové modely.

Klasický proces



Reverzní inženýrství



Obr. 1.2 Proces RE⁴.

1.2 Nástroje reverzního inženýrství

Hardwarové nástroje:

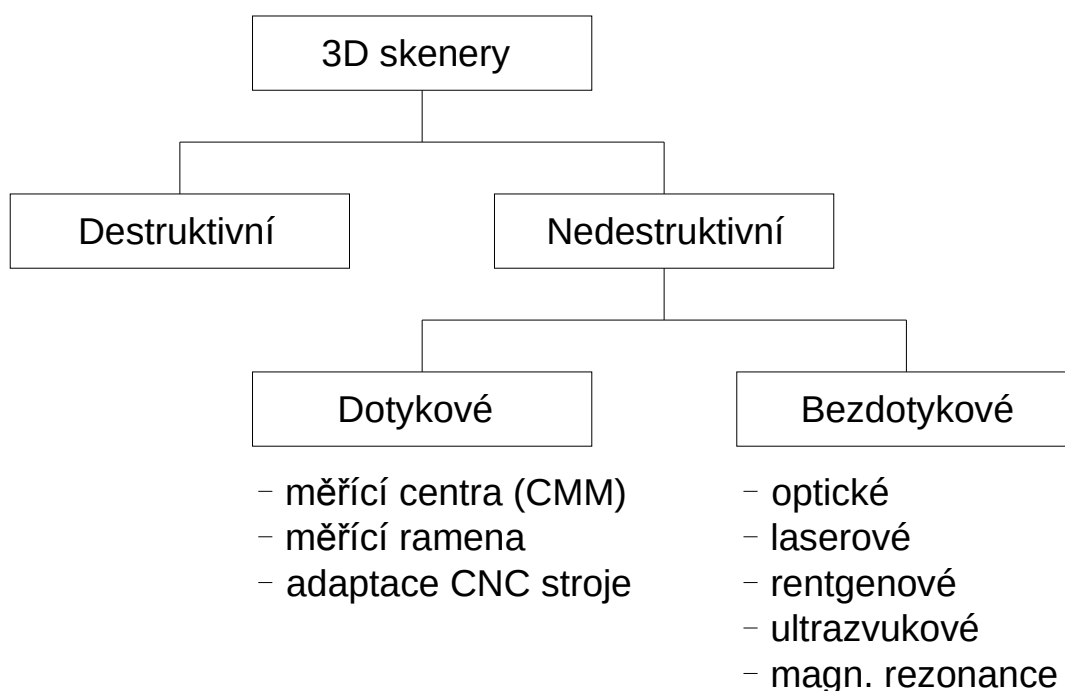
- digitizér - skládá se ze senzorové jednotky, výpočetní jednotky a z příslušenství (upevňovací stojany, stativy apod.)
- počítač s vybavením - umožňuje práci s digitalizovaným modelem, ukládání dat atd.
- ostatní pomůcky - referenční body, kalibrační desky a tyče, pomůcky pro manipulaci, upevnění a úpravu modelu

Softwarové nástroje:

- pro vykonávání procesu digitalizace
- pro zpracovávání a úpravy digitalizovaného modelu
- pro podporu CAQ - kontrola kvality, tvaru, rozměrů a kontrolních bodů
- pro další činnosti - simulace, FEM analýza apod.²⁹

1.3 Rozdělení 3D skenerů

V průmyslové praxi se prosadila celá řada zařízení k digitalizaci reálného modelu, které se souhrnně nazývají 3D skenery. Výstupem dat je u prostorové digitalizace soubor bodů, který se odborně nazývá mrak bodů (cloud of points). Tento výstup může být generován celou řadou skenerů, které se liší z několika hledisek. Jednotlivé metody se od sebe odlišují zejména dosahovanou přesností získaného virtuálního modelu, rychlostí práce a samozřejmě cenou. Cena zařízení se pohybuje v řádu statisícových až miliónových hodnot. V technické praxi jsou nejrozšířenější optické a laserové skenery.



Obr. 1.3 Rozdělení 3D skenerů.

1.3.1 Destruktivní skenery

Destruktivní skenery^{8,29} nejsou v praxi příliš rozšířeny, neboť jak již z jejich názvu vyplývá, dojde v průběhu skenování k nenávratnému zničení skenované součásti, což je v mnoha případech nepřijatelné. Uplatnění nachází zejména pokud je potřeba skenovat součást se složitou vnitřní geometrií.

Před vlastním skenováním je měřená součást umístěna na nastavitelný rám a pokryta speciálním kontrastním materiálem. Následně se z pracovního prostoru odčerpá vzduch. Vzniklý podtlak způsobí, že se tento speciální materiál dostane do všech dutin součásti. V dalším kroku se odfrézuje ultratenká vrstva materiálu. Vzniklý povrch se naskenuje pomocí optického skeneru. Tento proces se děje postupně po jednotlivých vrstvách, dokud nedojde k odebrání poslední vrstvy.

1.3.2 Bezdotykové skenery

Ve strojírenské praxi jsou velice často využívány bezdotykové skenery, zejména pak ty optické a laserové. V porovnání s mechanickými skenery patří mezi jejich největší výhodu zejména rychlost získání dat a většinou i vyšší dosahovaná přesnost. Při snímání nedochází ke kontaktu se skenovanou součástí a proto je možné skenovat i součásti s vyššími teplotami nebo měkké (např. pěnové) součásti.

1.3.2.1 Optické skenery

Mezi přední firmy zabývající se touto problematikou patří německá firma Gom. Nabízí celou řadu optických systémů sloužících nejen k digitalizaci, ale k měření deformací plechů, vibrací atd. Dva z těchto optických systémů, konkrétně systémy ATOS II a TRITOP, jsou využity v experimentální části této práce.

ATOS

Princip měření systémem ATOS (Advanced Topometric Sensor)^{8,10,29} je založen na optické triangulaci, fotogrammetrii a fringe projection (promítání pruhů). Uplatňuje se zejména tam, kde potřebujeme získat vysokou hustotu dat. Zařízení se skládá ze snímací hlavy, výpočetní stanice, sady nekódovaných bodů a dalšího příslušenství. Před započítím měření je potřeba povrch tělesa opatřit speciálními značkami, aby došlo k lepšímu provazování skenů, případně provést zmatnění povrchu. Při vlastním měření jsou na povrch skenovaného objektu pomocí projektoru a soustavy clon promítány pruhy světla, které se na povrchu objektu zdeformují podle tvaru objektu. Tyto pruhy jsou následně snímány pomocí dvou CCD kamer. Software pomocí složitých algoritmů vypočítá prostorové souřadnice jednotlivých bodů. Jednotlivé záběry je nutné pořizovat tak, aby na každém následujícím záběru byly minimálně 3 referenční body z předchozího skenu. Přesnost měření záleží na zkalibrování systému. Řádově se pohybuje okolo 50 μ m, ale je možné ji i zlepšit při zkombinování se systémem TRITOP. Skenovací hlava bývá běžně upnuta na stativu (trojnožce), případně je možné použít speciální stojany nebo robotnické rameno (obr.1.7).



Obr. 1.4 Systém ATOS umístěný na robotnickém rameni²⁸.

V současné době je zařízení dostupné v několika variantách:

ATOS I - základní varianta

- rozlišení CCD čipu 800 000 bodů na 1 záběr
- měřicí rozsah 1000 x 800 mm při rozlišení 1bod na 1mm.

ATOS II - rozlišení CCD čipu 1 400 000 bodů na 1 záběr

- oproti ATOSu I má přesnější projekční jednotku
- dále laserové odměřování vzdálenosti skeneru od objektu
- robustnější konstrukci
- měřicí objem 2000x1600mm

ATOS IIe - varianta ATOSu II s výkonnějším zdrojem světla ze syst. ATOS III

ATOS III - rozlišení CCD čipu je 4 000 000 bodů na 1 záběr

- oproti systému ATOS II má kvalitnější optické prvky a výkonnější zdroj světla
- měřicí objem 2000 x 2000 mm
- je určen pro nejnáročnější aplikace jako například měření velkých dílů s malými detaily na povrchu.

ATOS SO - varianta pro měření malých dílů

- nejmenší měřicí objem je 30 x 30 mm (u systému ATOS SO 4M)

ATOS XL - kombinace systému ATOS se systémem TRITOP¹⁰

TRITOP

Systém TRITOP^{8,10} se skládá z kalibrovaného digitálního fotoaparátu (zrcadlovky), výpočetní stanice (notebooku), sady kódovaných bodů, kalibračních tyčí, alternativně také z referenčních křížů.

Zařízení je založeno na principu fotogrammetrie. Na rozdíl od systému ATOS systém nezkoumá povrch skenovaného objektu, ale pouze souřadnice jednotlivých referenčních bodů v prostoru. Přibližné informace o tvarech tělesa je možné získat pouze výpočtem podle normál jednotlivých bodů.

Pořizovací náklady jsou v porovnání s jinými optickými systémy nižší. Výhodou je rovněž rychlost práce a jednoduchost obsluhy. Velikost

skenovaného objektu je prakticky neomezená. Dosahovaná přesnost je cca 0,02 mm. Více o systémech ATOS a TRITOP viz. Kapitola 3.



Obr.1.5 Sestava systému TRITOP⁶.

ARGUS

Argus^{8,10} je specializované zařízení, které je určeno s měření a kontrole výlisků. Nejprve je na povrch polotovaru (plech) vyleptána přesně definovaná síť bodů, na které se po provedení tvářecích operací projeví deformace. Z nich systém Argus po nasnímání CCD kamerou rozpozná přesnou geometrii výrobku, změnu tloušťky plechu, vektor tváření, hodnoty hlavních a vedlejších deformací, a množství dalších důležitých hodnot.



Obr.1.6 Sestava systému Argus¹⁰ a výstup měření v podobě barevné mapy změny tloušťky materiálu²⁸.

PONTOS

Systém Pontos^{10,29} je specializovaný systém určený k dynamickému měření polohy diskrétních bodů, vibrací a deformací. Před započítím měření je potřeba povrch opatřit referenčními body (tzv. retro značky). Systém pracuje na principu optické triangulace a proto je vybaven dvěma CCD kamerami, které jsou synchronizovány a zaznamenávají snímky ve stereo nastavení. V těchto snímcích jsou zaznamenány 3D posunutí referenčních bodů v různých deformačních stavech. Počet snímaných bodů je neomezený a je nezávislý na snímkovací frekvenci. Na závěr příslušný software vypočítá 3D souřadnice diskrétních bodů, jejich posunutí a vektory deformace.

Systém Pontos je využíván hlavně v oblasti automobilního a leteckého konstruování k analýze sekvenčních pohybů, k měření dynamiky spár a přesazení, relativních pohybů, útlumů, kmitání a tuhostí. V neposlední řadě i k měřením v aerodynamických tunelech.



Obr.1.7 Systém Pontos⁶.

ARAMIS

Sestava systému Aramis¹⁰ slouží k bezkontaktnímu měření 3D deformací v reálném čase. Je schopný zachytit tyto deformace jak při statickém, tak i dynamickém zatěžování a vykreslit rozložení těchto deformací do barevné mapy.

Před započítím vlastního měření je potřeba na povrch pomocí spreje nanést kontrastní vzor. Tento vzor se po zatížení deformuje současně se zatěžovaným objektem a jeho změna je zaznamenána 2 CCD kamerami, které mohou mít snímkovací frekvenci až 8000 snímků za sekundu. Následně jsou pomocí tzv. image processingu vypočítány 3D pozice bodů ležících na objektu a porovnáním odpovídajících si bodů v jednotlivých úrovních zatížení systém vypočítá 3D posuvy a následně tvar deformovaného objektu a 3D deformace.

Využití nachází zejména v oblasti dimenzování a zkoušení součástek, testování materiálů, optimalizace tvářecích procesů a dalších.



Obr.1.8 Systém Aramis⁶.

1.3.2.2 Laserové skenery

Tam, kde končí možnosti optických skenerů, zejména za zhoršených světelných podmínek, je výhodné použít některý z laserových skenerů. Jednotlivé typy laserových skenerů se velmi liší svojí konstrukcí, ale princip vždy spočívá ve vyslání laserového paprsku ze skeneru, jeho odražení a zachycení přijímačem (zpravidla CCD kamerou). Počítač poté vypočte na základě doby letu a úhlu dopadu paprsku tvar a polohu měřené plochy. Součástí některých skenerů je i kamera, díky níž je možné napodobit texturu povrchu. Mezi přednosti těchto zařízení patří přesnost, nezávislost na světelných podmínkách, mobilita a schopnost skenovat i hluboké neprůchozí díry, se kterými by měli optické skenery problémy. Nevýhodou těchto zařízení jsou zpravidla vyšší pořizovací náklady.

Systém Minolta Vivid

Společnost Minolta patří mezi přední firmy vyrábějící laserové skenery. Systémy Vivid^{29,30} pracují na principu dvojrozměrné aktivní triangulace. Vygenerovaný laserový paprsek prochází přes soustavu cylindrických čoček, kde dojde k jeho rozmítání. Po dopadu paprsku na povrch součásti je paprsek odražen a dopadá na CCD čip.

Příkladem takového zařízení je např. systém Minolta Vivid Vi9i. Na jeden záběr je podle použitého objektivu možné skenovat plochu od $93 \times 69 \times 26$ do $1495 \times 1121 \times 1750$ mm. Větší součásti je možné změřit i na více záběrů a jednotlivé skeny načíst do aplikace dodávané spolu se zařízením. Dosahovaná přesnost je 50 μm , což pro většinu aplikací dostačuje. Data ze skeneru lze přenášet buď přímo připojením na PC pomocí kabelu, nebo ukládat na paměťovou kartu. Hmotnost zařízení je 15kg. Standardním výstupem jsou formáty STL, DXF, OBJ, ASCII points, VRML.



Obr.1.9 Systém Minolta Vivid 9i³⁰.

HandyScan 3D

Bezkontaktní laserový skener HandyScan 3D^{29,31} je zařízení, které je stejně jako mnoho dalších založeno na principu triangulace s využitím reflexních bodů umístěných na snímaném tělese, případně na podložce vedle objektu. Pokud obě kamery vidí alespoň 4 tyto reflexní body je skener schopen přesně určit polohu snímaného objektu.

Systém HandyScan je výjimečný svými kompaktními rozměry, které mu zajišťují vynikající mobilitu, živým náhledem polygonové sítě v reálném čase a také tím, že je možné během snímání skenerem pohybovat. To umožňuje vysoká snímkovací frekvence $18\,000\text{ s}^{-1}$. V současné době je v řadě HandyScan nabízeno několik variant, které se liší počtem kamer, určením a přesností (0,04 – 0,05 mm).



Obr.1.10 Systém HandyScan 3D³¹.

1.3.2.3 Ultrazvukové skenery

Mezi cenově i konstrukčně jednodušší 3D skenery patří skupina ultrazvukových skenerů^{8,19,29}. Ty pracují na principu bezkontaktního snímání ultrazvukovou sondou ve tvaru pistole, která se manuálně přiblíží k povrchu a po stisknutí spouště dojde k vyslání ultrazvukového signálu. Tento signál je odražen a poté zachycen ultrazvukovými čidly a dekodován do prostorových souřadnic. Ke zpracování dat není potřeba žádný specializovaný software, ale postačuje některý z 3D CAD programů.

Mezi výhody patří zejména nízká cena, která je však vykoupena nižšími dosahovanými přesnostmi (0,3 - 0,5 mm). Pro většinu aplikací ve strojírenství je to nepřijatelná hodnota, ale pro některé aplikace jako např. průmyslový design nebo medicína však postačuje.

1.3.2.4 Rentgenové skenery

Rentgenové skenery¹⁹ používané ve strojírenství pracují na stejném principu jako ty používané ve zdravotnictví, pouze s tím rozdílem, že je zde využita vyšší intenzita rentgenového záření. Jako jeden z mála nedestruktivních skenerů umožňuje získat informace o vnitřní geometrii dutých součástí. Toho se využívá např. při kontrole potrubí, kotlů apod.

1.3.3 Dotykové skenery

Dotykové skenery, někdy označované také jako kontaktní nebo mechanické, zahrnují jak specializovaná měřicí zařízení v podobě mechanických ramen či souřadnicových měřících systémů CMM, ale také nejrozumnější adaptace CNC s využitím dotykových sond, apod.

1.3.3.1 Měřicí ramena

Kontaktní měřicí ramena^{7,8,10,19,29}, zastoupena např. systémy Faro nebo Microscribe, jsou opatřena dotykovým hrotem umístěným na konci ramene, jehož poloha je snímána pomocí čidel umístěných v otočných kloubech. Velikost skenovaných objektů je omezena dosahem ramene.

Vlastní skenovaný objekt je pro zpřesnění vhodné označit měřenými body, případně sítí. Počet měřených bodů musí být zvolen podle složitosti tělesa a podle požadované přesnosti. Výstupem z měřicího zařízení je množství bodů, z nichž je každý definován v souřadném systému.

Měření je možné provádět přímo pomocí některých grafických programů (např. Rhinoceros). Pro zpříjemnění obsluhy je možné měřicí rameno doplnit o příslušenství v podobě pedálu, který nahrazuje tlačítka myši, a tak je možné mít obě ruce volné pro práci s měřícím ramenem.

Výhodou je nízká cena zařízení v porovnání s např. optickými systémy, na druhou stranu jsou tato zařízení méně přesná (řádově v desetinách mm) a

měření je poměrně zdoluhavé. Například měřicí rameno Microscribe G2X (obr. 1.4) má přesnost měření 0,23 mm při dosahu ramene 1,27 m. Tohoto digitizéru se využívá zejména v oblasti designu a netechnických směrech, kde příliš nevadí jeho nižší přesnost.



Obr.1.11 Dotykový skener Microscribe G2X a jeho využití v antropologii²⁵.

1.3.3.2 Adaptační CNC stroje

Jako nástroje pro digitalizaci je možné využít upravenou CNC frézku s inverzním tokem dat^{27,29}. Zařízení je namísto nástroje opatřeno speciální sondou s dotykovým hrotem. Výstupem jsou elektronicky převedená prostorová data. Toto zařízení může představovat buď specializovaný stroj k vysokorychlostnímu zisku dat, nebo i frézku, která běžně slouží ke klasickému obrábění a měřicí sondu má pouze jako přídatné zařízení. Příkladem takové sondy je např. Renishaw OMP60²⁷ s optickým přenosem dat, která je vhodná pro obráběcí centra s automatickou výměnou nástrojů. Sonda je opatřena dotykovým hrotem, který je po kontaktu se skenovanou součástí vychýlen, čímž dojde k vyslání optického signálu a zařízení zaznamená údaj o aktuální poloze. Pro větší objemy dat je však výhodnější použít specializovaný CNC stroj nebo souřadnicový měřicí stroj CMM.



Obr. 1.12 Dotyková sonda OMP 60 firmy Renishaw²⁷.

1.3.3.3 Souřadnicové měřicí systémy CMM

Zařízení CMM^{26,29} jsou primárně určena pro velmi přesnou kontrolu rozměrů, ale lze je také využít pro digitalizaci. Zařízení se vyrábějí v nejrůznějších velikostech. Od laboratorních s malými rozsahy měření až po zařízení s jejichž pomocí lze měřit/skenovat i velké objekty jako je např. karoserie osobního automobilu. Např. zařízení Mitutoyo CARBstrato (obr.1.6) má měřicí rozsah x,y,z až 18000x3900x3500 při zachování přesnosti minimálně 90 μm (na 18 m délky). V porovnání s ostatními metodami jsou získaná data velmi přesná (řádově i tisíce mm), což je ovšem vykoupeno vyššími pořizovacími náklady, většími nároky na pracovní prostředí (stálá teplota, vlhkost apod.) a omezenou mobilitou.



Obr.1.13 Souř. měřicí stroje CMM Mitutoyo Euro C-STRATO a CARBstrato²⁶.

1.4 Aplikace technologií reverzního inženýrství

Technické směry:

- testování aerodynamiky – prototypy mohou být testovány i přímo v aerodynamickém tunelu
- měření deformací
- měření odchylek - CAI (Computer Aided Inspection)
- průmyslový design – např. při skenování hliněných modelů při vývoji designu automobilu
- srovnávací analýzy
- analýza pevnosti – FEM
- simulace tažení plechů
- ergonomie - výroba sedadel do automobilů, obuvi, oblečení apod.
- kontrola kvality - automatizované vyřazování zmetků
- programování drah robotů
- zjišťování vnitřních vad modelu
- renovace a opravy dílů bez původní výkresové dokumentace
- výroba neoriginálních součástí - typickým příkladem jsou tuningové díly, kde výrobce automobilu samozřejmě neposkytne originální výkresovou dokumentaci úpravci a pro kvalitní lícování dílce je potřeba použití RE
- navrhování obalů
- kontrola kolizí dílů
- přímé obrábění
- simulace vstřikování plastů

Netechnické směry:

- ortopedie (vývoj protéz a implantátů)
- estetická chirurgie (odpadá potřeba dělat sádrové otisky)
- diagnostika (porovnávání vývoje pacienta)

- zábavní průmysl (virtualizace postav ve videohrách)
- filmový průmysl - speciální efekty (např. ve filmu Jurský park byla druhohorní pravěká zvířata nejprve vymodelována jako reálné makety a až poté byla naskenována a rozpohybována)
- rekonstrukce staveb
- výroba duplikátů a replik uměleckých děl
- antropologie
- archeologie - zaznamenání poloh nálezů přímo na nalezišti, rekonstrukce vzhledu pravěkých zvířat, lidí apod.
- kosmetický průmysl – např. pro porovnání účinků krémů na vrásky
- a další^{7,8,10,18,31}

2 ADITIVNÍ TECHNOLOGIE RAPID PROTOTYPING

Pojmem rapid prototyping^{11,14} se označuje proces zrychlené výroby prototypové součásti nebo fyzického modelu z počítačových dat vytvořených v některém z CAD programů nebo získaných metodou reverzního inženýrství. Technologie RP nacházejí uplatnění nejen ve všech odvětvích strojírenství, ale i v lékařství nebo architektuře. V neposlední řadě nachází uplatnění také v marketingu, kdy je možné zákazníkovi prezentovat produkt, který se pro něj teprve vyvíjí.

Historie metody RP začíná v průběhu 80. let, kdy vznikla metoda stereolitografie. V současné době se tvorba modelů a prototypů zaměřuje zejména na oblast vývoje forem a nástrojů. Na významu také nabývá využití při koncepčním konstruování, kdy je možné ověřit některé vlastnosti budoucího výrobku ještě během vývoje, případně je možné využít fyzický model k simulacím a různým typům zkoušek (obtékání, namáhání, apod.).

Současné CAD systémy jsou již natolik pokročilé, že je v nich možné provádět celý vývojový proces (vizualizace, rendrování, virtuální realita, MKP, dynamické analýzy, ...), přesto je však práce s fyzickým objektem pro konstruktéra či designéra v některých případech výhodnější. Na fyzickém modelu se dá snadněji měnit design, odstraňovat nejrůznější chyby, kontrolovat smontovatelnost, opravitelnost, ergonomii apod.

2.1 Obecný princip metod RP

Technologie RP^{11,14} jsou technologiemi aditivními. To znamená, že jsou na rozdíl od metod subtraktivních (např. obrábění) založeny na principu přidávání materiálu po vrstvách stejné tloušťky. Postupným skládáním těchto 2D vrstev na sebe vznikne 3D objekt. Technologiemi RP je možné vyrobit i tvarově velmi složité součásti, a to i takové, které by byly jinými metodami nevyrobitelné (např. forma se zavřenými dutinami).

Podle konkrétní technologie je možné využívat celé spektrum materiálů, jako jsou např. fotopolymery, termoplasty, speciální druhy papíru nebo kovové

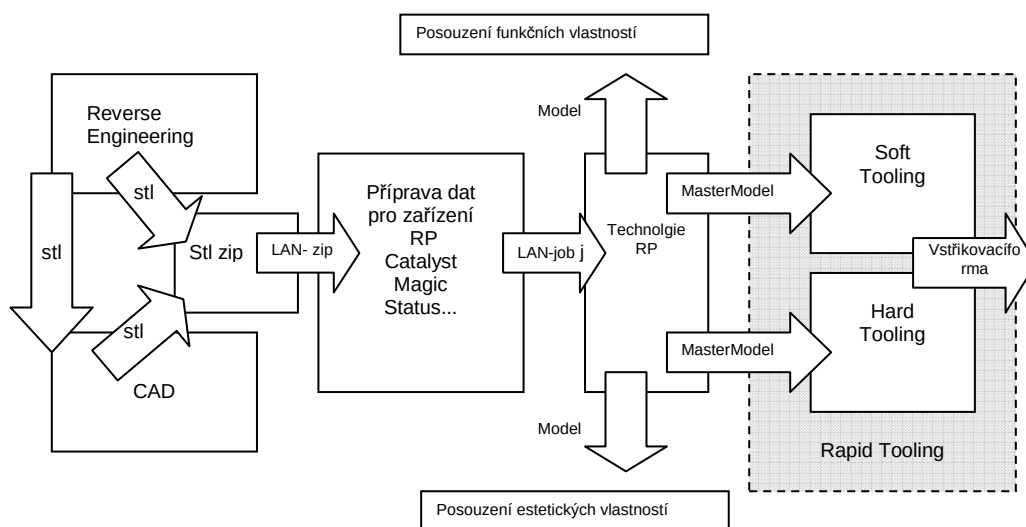
prášky. Používané materiály však většinou svými vlastnostmi neodpovídají těm, které se používají v konvenční výrobě.

2.2 Data pro tvorbu modelu

Ve většině případů je zdrojem dat virtuální model^{11,14}, nakreslený v libovolném 3D CAD systému (CATIA, SolidWorks, Pro/Engineer aj). Model může být nakreslen plošným nebo objemovým modelářem, avšak je nutné, aby všechny povrchy byly uzavřené. Model je následně softwarem vyexportován ve výměnném formátu (nejčastěji STL).

Další možností, jak získat potřebná data, je skenování reálné součásti některou z metod reverzního inženýrství (viz kapitola 1.) Výsledkem skenování je mrak bodů, který se převede na trojúhelníkovou síť polygonů, která se poté vyhladí. Tato síť se následně převede do vhodného formátu.

Nejméně využívaným zdrojem dat je některý z CNC řídících programů (Sinumerik, Heidenheim aj.)



Obr. 2.1 Etapy rychlé výroby prototypů¹⁴.

Získaná data jsou dále zpracována speciálním softwarem dodávaným se systémy pro RP, který speciálním výpočtovým postupem rozloží 3D geometrii na jednotlivé příčné řezy definované výšky. Obvyklá výška vrstev je 0,1 až 0,2 mm. S takovým softwarem je možné vykonávat ještě celou řadu

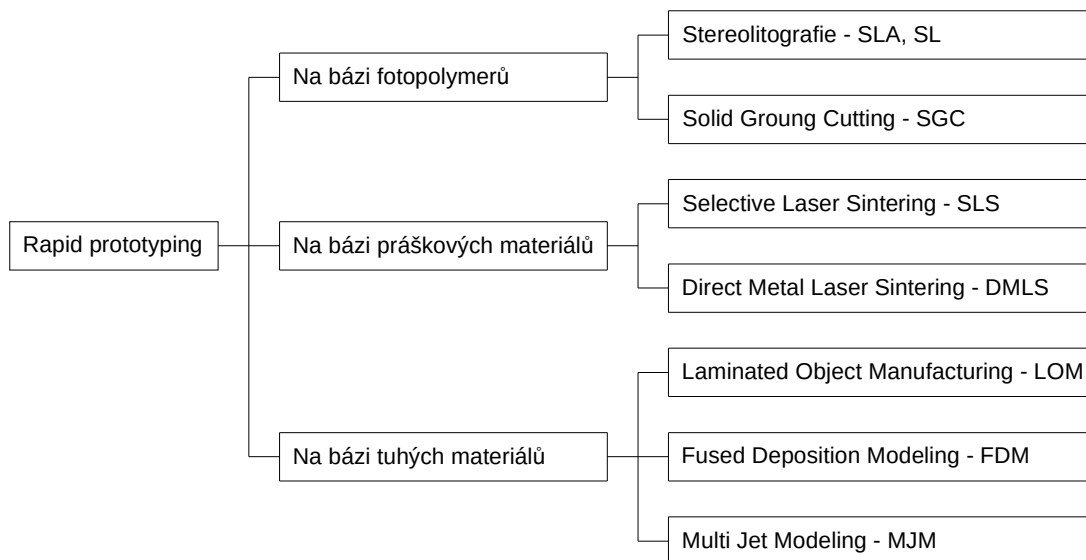
pomocných operací jako např. stanovení měřítka rozměrů součásti, zkoušení a oprava chybných STL dat, nebo navržení podpůrné konstrukce.

2.3 Zařízení na výrobu prototypů

Modely se utváří na spec. zařízeních pracujících na těchto principech:

- spékáním prášků (kov, plast)
- nanášením vrstev taveniny (plast, vosk)
- spojováním speciálních folií

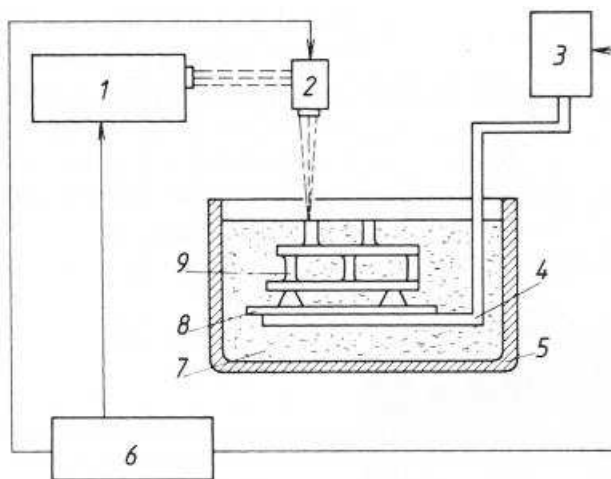
V současné době je komerčně nejvíce využíváno následujících 7 aditivních technologií (obr.3.2), které jsou souhrnně označovány jako rapid prototyping.



Obr.2.2 Rozdělení hlavních technologií Rapid Prototyping

2.3.1 Stereolitografie - SLA

Metoda SLA^{11,14,16,29} byla vyvinuta společností 3D Systems Inc. v roce 1987. Přestože jde o historicky první metodu tvorby prototypů metodou RP, stále se řadí mezi ty nejpreciznější. Přesnost metody se pohybuje okolo 0,05-0,15 mm na 100 mm délky. Nespornou výhodou je také široká škála používaných materiálů. Podobně jako u metody SGC je základním principem vytvrzování vrstvy fotopolymeru - tedy plastické hmoty citlivé na světlo. Oproti jiným metodám je možné vyrábět modely s milimetrovými prvky, miniaturními otvory a s přesnými detaily. Proto se metoda kromě běžných aplikací uplatňuje i při výrobě funkčních prototypů a forem pro odlévání a vstřikování.

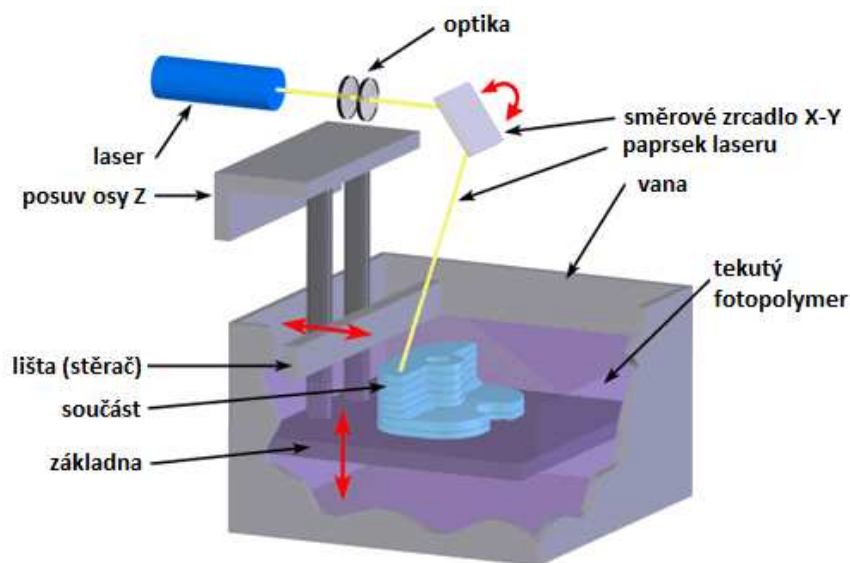


Obr. 2.3 Schéma zařízení pro technologii stereolitografie (1 - laser, 2 - pracovní hlava laseru, 3 - systém pro posuv nosné desky, 4 - nosná deska, 5 - pracovní vana, 6 - CNC řídicí systém, 7 - fotopolymer, 8 - podložka, 9 - vyráběná součást)¹³.

Vlastní proces vytvrzování probíhá v pracovní komoře v níž je umístěna nádoba s epoxidovou pryskyřicí, ve které se ve směru osy Z pohybuje nosná deska (platforma). Počítač, jehož součástí je řídicí jednotka, má na starosti ovládání celého stroje - od nastavení parametrů laseru až po řízení procesu výroby. Poslední část, opticko-laserový systém, se skládá z čoček, soustavy zrcadel pro nasměrování laserového paprsku a laseru (používá zejména argonový (Ar+), heliumcadmiový (HeCd) nebo pevnolátkový Nd:YAG laser).

Ještě než se započne vlastní stavba je nutné počítačový model zbavit případných chyb jako jsou převrácené trojúhelníky, špatné hrany nebo tzv. díry v modelu. Je vhodné určit polohu modelu tak, aby se minimalizovaly dokončovací práce, poté se ještě vygenerují podpory a nakonec se vše přeloží do speciálního formátu, v němž je definován tvar jednotlivých vrstev modelu. Tyto vrstvy bývají silné 0,05 až 0,15 mm, což zaručuje dosažení i těch nejmenších detailů. Stavba SLA modelu je založena na postupném vykreslování 2D vrstev na hladinu pryskyřice laserovým paprskem, který je zaměřován poměrně složitou optickou soustavou. V místě dopadu paprsku je pryskyřice vytvrzena a platforma se posune o zadaný krok (vrstvu) ve svislé ose směrem dolů. Před vykreslováním každé vrstvy zarovná nůž (stěrač) vrstvu pryskyřice tak, aby byla zachována konstantní tloušťka vrstvy. Celý proces se opakuje tolikrát, dokud není vykreslena poslední vrstva. Uchycení modelu k platformě je dosaženo podporami, které jsou ze stejného materiálu jako vlastní model. Podpory mají za úkol model fixovat v dané poloze a zabránit jeho zborcení, ale zároveň musí být řešeny tak, aby se daly co nejnáze z modelu odstranit a neovlivnily výslednou kvalitu povrchu.

Po skončení stavby se model vyjme, dokonale se umyje od nevytvrzené pryskyřice a odstraní se podpory. Na finální vytvrzení slouží UV komora, kde model získá požadovanou pevnost, opracovatelnost, případně barvu apod.



Obr. 2.4 Princip metody SLA (podle¹⁶).

Výhody:

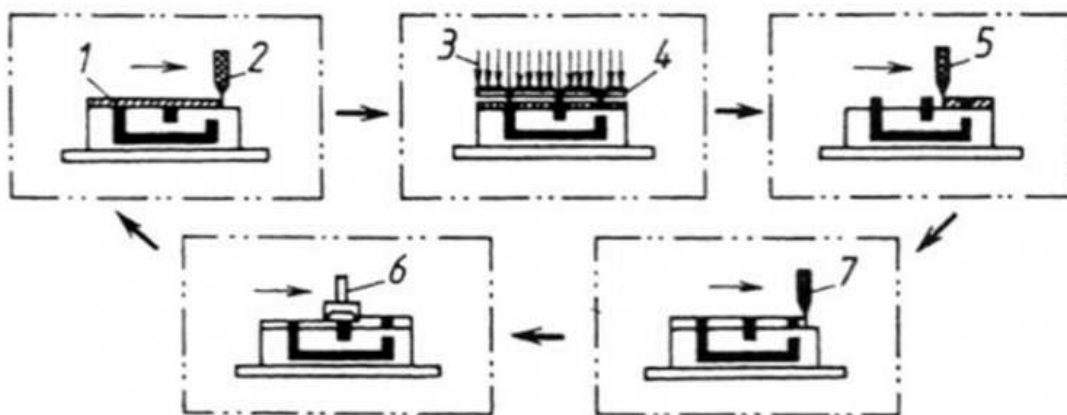
- přesnost
- jakost povrchu
- zhotovování objemných modelů
- zhotovování přesných detailů a tenkých stěn

Nevýhody:

- pomalý proces vytvrzování polymeru
- u některých materiálů také malá tepelná odolnost vzniklého modelu
- nutnost čištění a sušení
- energetická náročnost laseru
- toxicita fotopolymeru

2.3.2 Solid Ground Curing - SGC

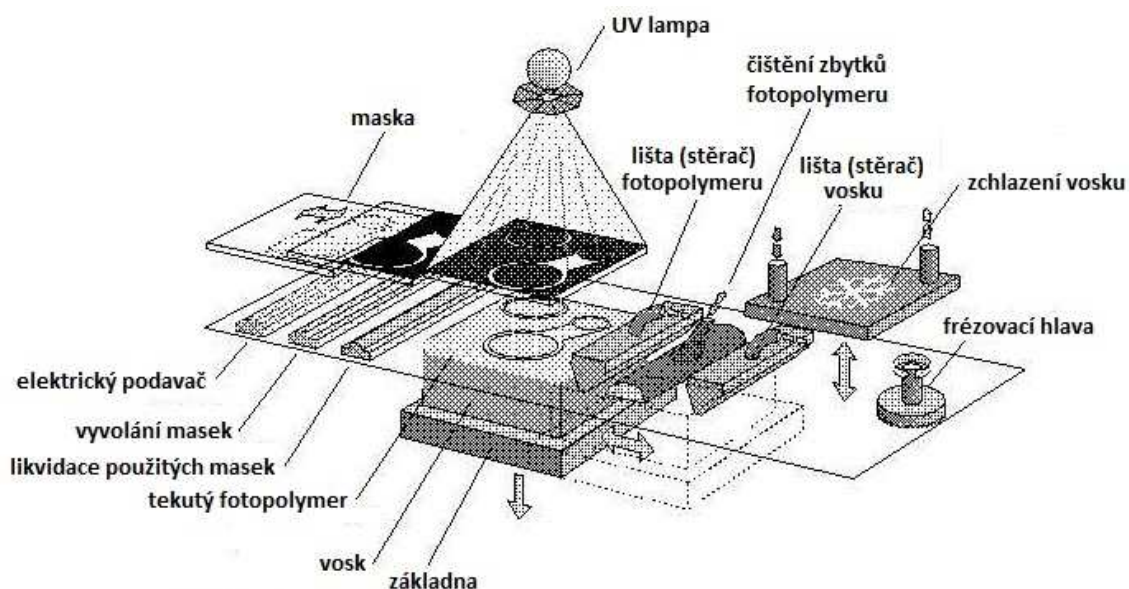
Tato metoda byla vyvinuta izraelskou firmou Cubital Inc^{11,15,29} v roce 1987. V mnoha ohledech se jedná o metodu podobnou jako SLA. Používané materiály jsou stejné, ale nanesená vrstva je vytvrzována celá najednou. Osvícení se provádí UV lampou přes negativní masku, která je nejčastěji tvořena skleněnou destičkou, na níž je vyznačen tvar vytvářené vrstvy.



Obr. 2.5. Schéma postupu technologie SGC

(1 – obrobek, 2 – nanášený fotopolymer, 3 – vytvrzování fotopolymeru osvitem UV zářením, 4 – negativní maska, 5 – odstranění přebytečného fotopolymeru, 6 – frézovací hlava, 7 – nanášení vrstvy vosku)¹⁵.

Výroba modelu probíhá ve dvou oddělených současně probíhajících cyklech. Nejprve se na platformu nanese vrstva fotopolymeru, která má větší výšku než bude finální výška vrstvy. Poté je na skleněnou destičku vytvořena negativní maska, přes kterou následně dojde o osvětlení fotopolymeru. Místa kam dopadne světlo UV lampy se vytvrdí. Z míst, kde bylo světlo odstíněnou maskou, se nevytvrzená pryskyřice odsaje a vzniklý meziprostor se vyplní voskem. Konstantní výška vrstvy se narozdíl od metody SLA zajišťuje až po vytvrzení pryskyřice odfrézováním přebytečného materiálu. Tím je vrstva dokončena a připravena k nanesení další tenké vrstvy fotopolymeru. Vosková výplň zůstane v dutinách vytvářené součásti jako podpurná konstrukce až do konce procesu vytváření, potom je chemickou cestou (pomocí kyseliny citrónové) odstraněna.



Obr. 2.6 Princip metody SGC (podle¹¹).

Výhody:

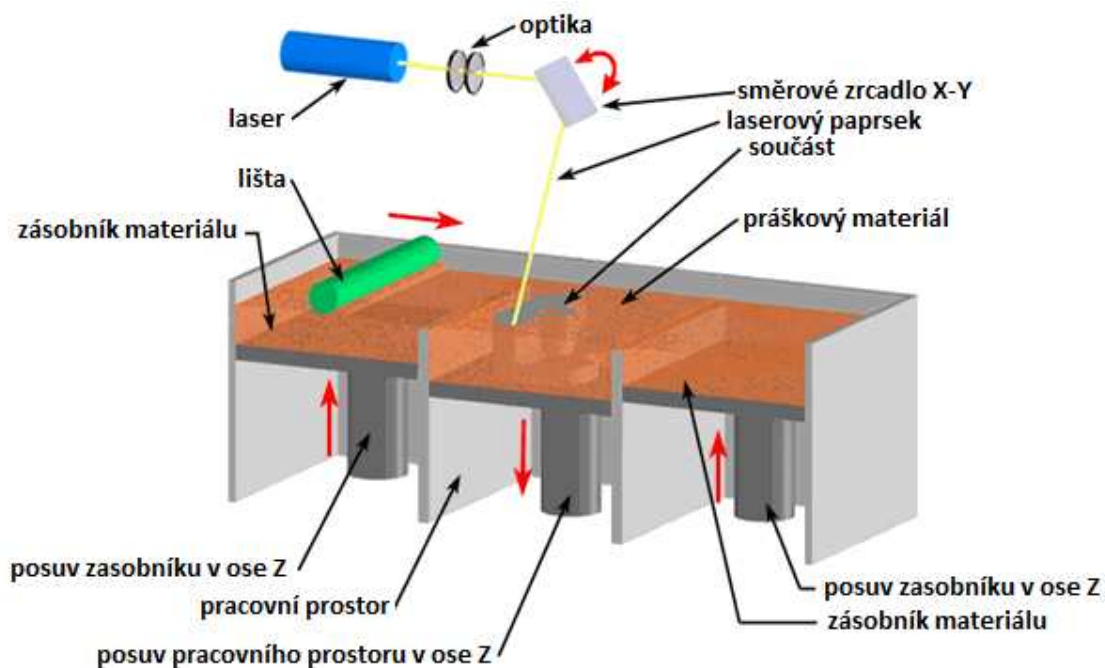
- poškozené vrstvy jsou odfrézovány
- minimální smrštění modelu
- model se staví bez podpor
- jakost povrchu
- zhotovování objemných modelů

Nevýhody:

- velké rozměry zařízení
- hlučnost
- množství odpadu
- problém s usazeninami vosku
- energetická náročnost

2.3.3 Selective Laser Sintering - SLS

Metoda Selective Laser Sintering^{11,13,16,29} je jednou z metod, jejíž princip je založen na spékání práškového materiálu pomocí laseru. Metoda byla vyvinuta na University of Texas v Austinu v roce 1989. Na rozdíl od jiných metod jsou modely vyrobené metodou SLS velmi pevné. Materiál ve formě prášku (částice mají 20 – 100 μm) je natavován teplem CO_2 laseru a spékán do požadovaného tvaru. Aby se zabránilo oxidaci, musí být prášek spékán v ochranné atmosféře inertního plynu (dusík nebo argon).



Obr. 2.7 Princip metody SLS (podle¹⁶).

Proces začíná nanesením vrstvy práškového materiálu na podkladovou desku. Podle vypočtených souřadnic bodů rovin řezů je řízena XY skenovací hlava, která vede paprsek laseru nad povrchem prášku nasýpaného ve vaně. V místě působení laseru se přídatný materiál buď speče, nebo roztaví a ztuhne. Okolní nenatavený materiál slouží jako nosná konstrukce. Po vytvoření jedné vrstvy se nosná deska sníží o hodnotu odpovídající hloubce vrstvy. Je možné vytvářet vrstvy tloušťky od 0,02 mm do několika desetin milimetru. Nespornou výhodou této metody je široká škála používaných materiálů. V podstatě je možné použít jakýkoliv prášek, který se působením tepla taví nebo měkne - například termoplastické materiály jako jsou polyamidy, polyamidy plněné skelnými vlákny, polykarbonáty, polystyreny, speciální nízkotavitelné slitiny z niklových bronzů nebo ocelové prášky povlakované polymery. Přitom na stejném zařízení většinou nelze přecházet od jednoho materiálu k druhému, neboť jejich vytvrzení si vyžaduje výrazně odlišné podmínky.

Existuje několik metod SLS které se dle použitého materiálu dále dělí na:

- Laser Sintering Plastic: podobně jako u metody FDM lze součást vyrobit z několika druhů plastických materiálů. Při použití polystyrenu je možné vyrobenou součást využít při metodě lití do ztraceného vosku. Součásti vyrobené z nylonu dosahují vynikající hodnoty tvrdosti, houževnatosti a teplotní odolnosti. Tyto modely jsou proto vhodné pro funkční zkoušky nebo testy skutečně potřebného stupně lícování.
- Laser Sintering Metal: jako základní materiál se používají speciálně vyvinuté kovové prášky. Vyrobené součásti mají dostatečnou pevnost a mechanickou odolnost, takže je lze použít především jako formy pro výrobu plastových výlisků vstřikováním nebo lisováním.
- Laser Sintering Formsand: někdy označované také jako "Foundry Sand". Jde o jednu z nejnovějších metod. Metoda používá jako výchozí materiál upravený slévárenský písek, jehož vytvrzováním je možno bez jakýchkoliv mezikroků vytvořit klasickou pískovou formu pro lití.

- Laser - Sintering Ceramic: jako výchozí materiál se používá prášek spojovaný pomocí tekutého pojiva. Nanášení pojiva je zajištěno pomocí Ink-Jet tryskové hlavy, která je vedena v rovině XY podle předem vypočítaných řídicích údajů. Touto metodou se dají vyrábět součástky z keramického prášku, formy a jádra pro technologii přesného lití.
- Laser Micro Sintering: výchozím materiálem je u této metody wolfram o velmi malé zrnitosti. Pro spékání prášku se používá Nd:YAG laser o výkonu 10 W. Výška jednotlivých vrstev je 0,03 mm, přičemž se dosahuje kvality povrchu méně než Ra 1,5 µm.
- 3D Laser Cladding: výchozím materiálem je opět kovový prášek, který se ale dodává plynule do stopy dopadu paprsku laseru, kde se taví. Proces probíhá v uzavřené komoře za asistence inertního plynu. Vyráběné součástky jsou plně srovnatelné se součástmi vyrobenými běžnými technologiemi. Jako prášku např. při výrobě součástí letadel se používají titanové, niklové, kobaltové a hliníkové slitiny. Pro výrobu náhrad kyčelních kloubů se používá práškový materiál Ti6Al4V, přičemž výrobek má stejné hodnoty tažnosti a odolnosti proti únavě jako dosud používané tvářené materiály.

Výhody:

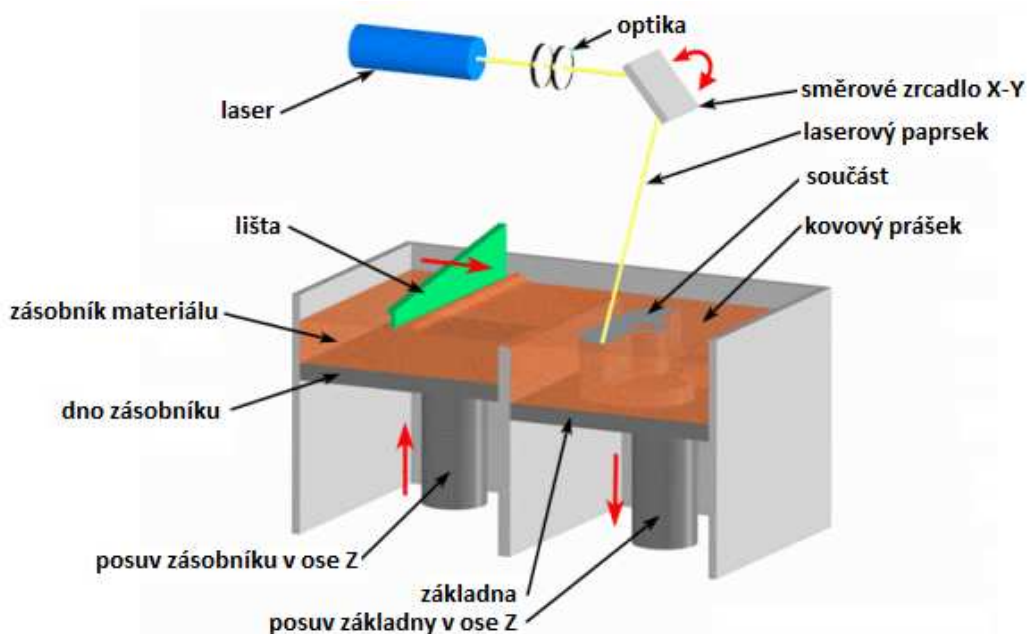
- široká paleta materiálů
- vynikající pevnost modelu $\Rightarrow$ zhotovování funkčních součástí
- model se staví bez podpor
- hotové výrobky nevyžadují žádný složitý post-procesing

Nevýhody:

- prostorová náročnost zařízení
- nebezpečí rozptýlení prášku do vzduchu
- nízká kvalita povrchu
- energetická náročnost

2.3.4 Direct Metal Laser Sintering - DMLS

Jde o další z metod využívající vstupní materiál ve formě prášku. Technologie byla vyvinuta a na trh dodána firmami RPI a EOS GmbH^{16,17,29} v roce 1994. Kovové díly vyrobené touto technologií jsou z hlediska mechanických vlastností plně srovnatelné s obráběnými či odlévanými díly. Spektrum aplikací je velmi široké – od prototypů, přes malosériové díly až po finální, individualizované výrobky. Výhody procesu rostou s tvarovou komplexností dílů. Čím je geometrie výrobku složitější co do tvaru a četnosti výskytu detailních prvků, tím je technologie ekonomicky efektivnější.



Obr. 2.8 Princip metody DMLS (podle¹⁶).

Technologie je založená na postupném tavení velmi jemných vrstev kovového prášku pomocí laserového paprsku. První vrstva prášku je nanесena na ocelovou platformu, která slouží zároveň k odvodu tepla, takže roztavený kov velmi rychle ztuhne. Proces probíhá většinou v ochranné atmosféře dusíku (pro většinu materiálu) případně argonu. Dusík je dodáván generátorem dusíku, který je zásobován tlakovým vzduchem a není tak potřeba dodávat dusík v tlakových lahvích.

Energie laserového paprsku lokálně taví kovový prášek pouze v konturách řezu, který je definován průnikem dané roviny tělesem výrobku. V průběhu stavby dílu je nezbytná fixace správné polohy dílu pomocí podpůrné struktury, která je ukotvena k základní ocelové platformě. Podpůrné prvky jsou stavěny vrstvu po vrstvě zároveň s výrobkem. Minimální tloušťka vrstvy je 20 μm . Laser důkladně taví kov ve formě prášku a tím je zajištěno dokonalé spojení jednotlivých vrstev. Např. u zařízení EOSINT M 270 je materiál ozařován výkonným 200 Ytterbium (Yb)-fibre „dual spot“ laserem, který umožňuje dosažení jemného rozlišení detailu a díky vyšší hustotě energie je i rychlost stavby dílu vyšší v porovnání s předchozím typem zařízení EOSINT M 250, které bylo vybaveno CO₂ laserem.

Po skončení poslední vrstvy je platforma s výrobky vyjmuta z pracovního prostoru zařízení a díly jsou odděleny od platformy. Následně je nutné provést ještě některé dokončovací operace. Nejprve je nutno odstranit podpůrné struktury z povrchu výrobku, povrch lze dále tryskat, brousit, leštit či obrábět stejným způsobem, jako klasický kovový materiál. Principiální výhodou přímé výroby kovových dílů pomocí DMLS procesu je fakt, že odpadá potřeba výrobního nářadí (forem, lisovacích nástrojů atd.). Nespotřebovaný prášek je z 98% znovu využíván pro výrobu, takže proces je ekonomický a zároveň i ekologický. DMLS umožňuje vytvářet vnější i vnitřní tvary součástí (jakkoli složité) zároveň, což v důsledku přináší možnost přímé výroby tvarově komplexních dílů, které by dříve bylo nezbytné z technologických důvodů vyrobit z několika součástí - je zde určitý potenciál úspory výrobních nákladů, zkrácení doby kompletace a zvýšení spolehlivosti. DMLS proces umožňuje aplikovat drobné konstrukční variace pro každý jednotlivý díl, tzn. výrobu produktů optimalizovaných dle individuálních požadavků zákazníka.

Materiálů používaných touto technologií je celá řada - od lehkých slitin přes oceli až po super-slitiny a kompozity, další jsou ještě ve fázi vývoje. Mezi nejčastěji používané materiály pro metodu DMLS jsou:

- Direct Metal 20 (DM 20) - velmi jemný multi-komponentní prášek na bázi bronzu. Výsledné díly nabízí dobré mechanické vlastnosti s výborným

rozlišením detailu a kvalitou povrchu. Povrch výrobku lze snadno dokončit tryskáním nebo může být velmi snadno vyleštěn.

- Direct Steel 20 (DS 20) - velmi jemný multi-komponentní prášek na bázi oceli, nabízí vysokou pevnost, tvrdost, ořezuvzdornost a hustotu povrchu.
- Nerezová ocel (EOS SS 17-4) - nerezová ocel ve formě jemného prášku. Tento typ oceli je charakteristický vysokou korozní odolností a mechanickými parametry. Výrobky mohou být dále opracovány tryskáním, obráběním, leštěním, mohou být svařovány či pokoveny.
- Martenzitická ocel 1.2709 (EOS MS 1) - martenzitická ocel ve formě jemného prášku. Tento typ oceli je charakteristický velmi vysokou pevností a tvrdostí povrchu. Je snadno obrobitelná a následně vytvrditelná až na 54 HRC.
- Kobalt chrom (EOS CC MP1) - směs jemného prášku, ze kterého lze na zařízení EOSINT M270 získat díly z Cobalt Chrome Molybden superslitiny. Tato superslitina je charakteristická excelentními mechanickými parametry (pevnost, tvrdost ...), korozní a teplotní odolností.
- Titan (EOS Ti 64 / Ti64ELI) - Ti6AlV4 slitina ve formě jemného prášku. Pro tuto lehkou slitinu jsou charakteristické excelentní mechanické vlastnosti a korozní odolnost v kombinaci s nízkou specifickou hmotností a biokompatibilitou.

Výhody:

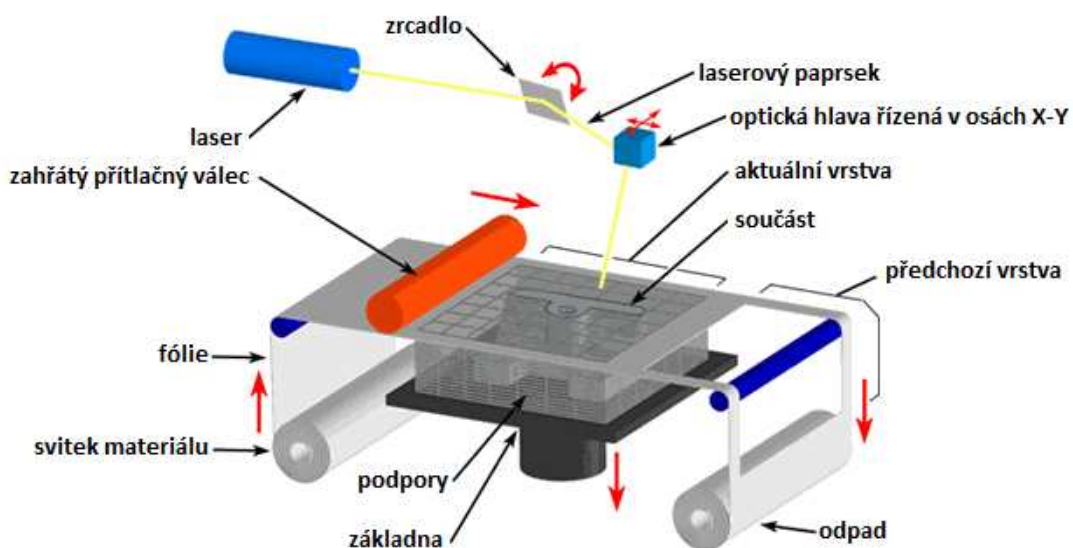
- velký výběr kovových materiálů
- vynikající pevnost modelu $\Rightarrow$ zhotovování funkčních součástí
- model se staví bez podpor
- nespotřebovaný prášek je z 98% znovu využit

Nevýhody:

- prostorová náročnost zařízení
- nebezpečí rozptýlení prášku do vzduchu
- nízká kvalita povrchu
- energetická náročnost

2.3.5 Laminated Object Manufacturing - LOM

Technologie LOM^{15,16,29} byla vyvinuta firmou Helisys of Torrance CA. v roce 1991. Modely vytvořené touto metodou jsou vyrobeny z velkého množství vrstev fólií, které jsou z jedné strany opatřeny přilnavým nátěrem. Jednotlivé vrstvy jsou následně oříznuty CO₂ laserem do požadovaného tvaru. Fólie jsou vyráběny z množství materiálů jako plasty, kovy, keramika nebo kompozity. Nejpoužívanějším materiálem je však papír.



Obr. 2.9 Princip metody LOM (podle¹⁶).

Výroba modelu spočívá v postupném kladení jednotlivých vrstev a jejich následném a přitlačení a zahřátí na 330°C. Zvýšená teplota způsobí aktivaci pojiva na spodní straně fólie. Po nalepení každé vrstvy se laserem, jehož hloubka řezu je přesně rovna tloušťce fólie, ořeže obrys a přebytečný materiál je nařezán na drobné čtverce. Poté se nanese další vrstva fólie a celý proces se opakuje dokud není vytvořena celá součást.

Vytvořené součásti mají podobné vlastnosti, jako kdyby byly vyrobené ze dřeva. Je možné provést dokončení běžnými obráběcími metodami. Dále je vhodné povrch opatřit silikonovým, uretanovým nebo epoxidovým nástřikem, aby se zabránilo tvarovým změnám vlivem vlhkosti.

Výhody:

- možnost použití jakéhokoliv materiálu ve formě fólie
- proces je ekologický
- rychlost
- výroba rozměrných modelů
- snadné obrábění

Nevýhody:

- problém s kontrolou intenzity laseru tak, aby nenařezával i předchozí vrstvy
- množství odpadu
- nevhodné pro modely s tenkou stěnou
- produkce nežádoucích výparů
- pracné odstraňování podpor

2.3.6 Fused Deposition Modeling - FDM

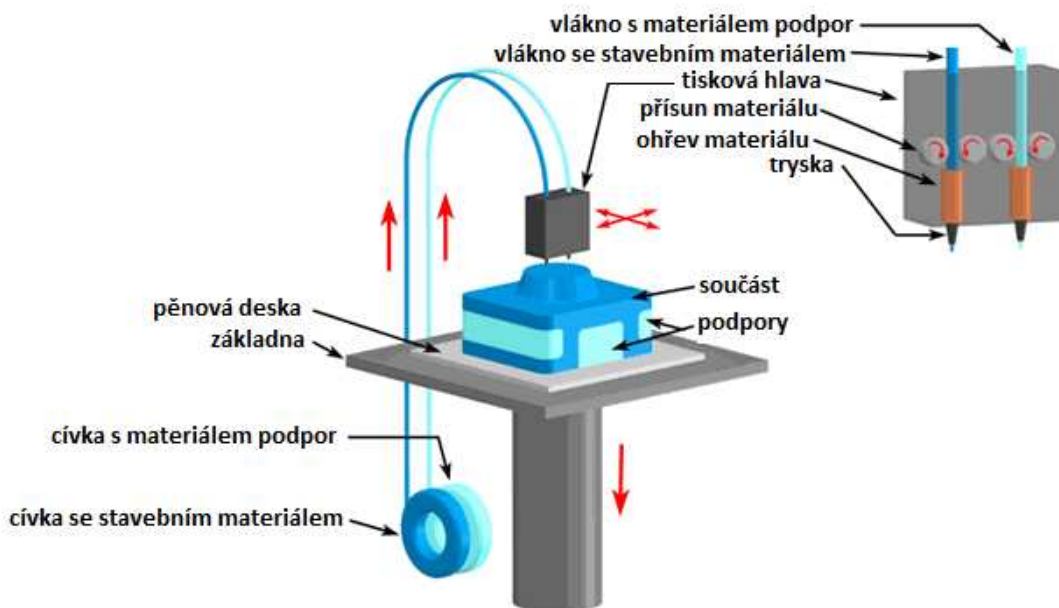
Technologie FDM^{11,15,16,29} byla vyvinuta v roce 1988 společností Stratasys, Inc. Na rozdíl od výše zmíněných však nevyužívá laseru, ale principem je přímé nanášení různých druhů netoxických termoplastů (ABS, ABS+, polykarbonát apod.) nebo vosku.

Materiál ve tvaru tenkého vlákna je navinut na cívkách a vložen ve speciálních kazetách. Každé zařízení obsahuje jednu nebo dvě kazety. V jedné se nachází stavební materiál a ve druhé materiál podpor. Z těchto kazet se materiál odvíjí a přichází do vyhřívané trysky, která se pohybuje v rovině nad pracovním prostorem. V trysce je ohříván na teplotu o 1 °C vyšší, než je jeho teplota tavení. Při styku s povrchem vytvářené součástky se vlákna vzájemně spojují a vytvářejí tak požadovanou ultratenkou vrstvu, která ihned tuhne. Součást se vytváří na nosné desce, která se vždy po nanesení jedné vrstvy sníží o tloušťku další vrstvy a začne se tisknout další vrstva. Takto se proces opakuje dokud není vytisknuta poslední vrstva.

Jakmile proces tisku skončí, je součást i s oporami vyjmuta z pracovního prostoru tiskárny. Pokud jsou podpory z materiálu ABS, tak se

odstraňují mechanicky. V případě rozpustných podpor je součást ponořena do speciálního roztoku, ve kterém se podpory rozpustí. Vyrobené součásti není potřeba dále upravovat, ale je možné je dále obrábět, upravovat nebo barvit.

Zařízení pracující s technologií FDM mohou být využívána také v běžném kancelářském prostředí, neboť u nich byla odstraněna práce s toxickými materiály a s citlivými zařízeními pro laserové snímání.



Obr.2.10 Princip metody FDM (podle¹⁶).

Výhody:

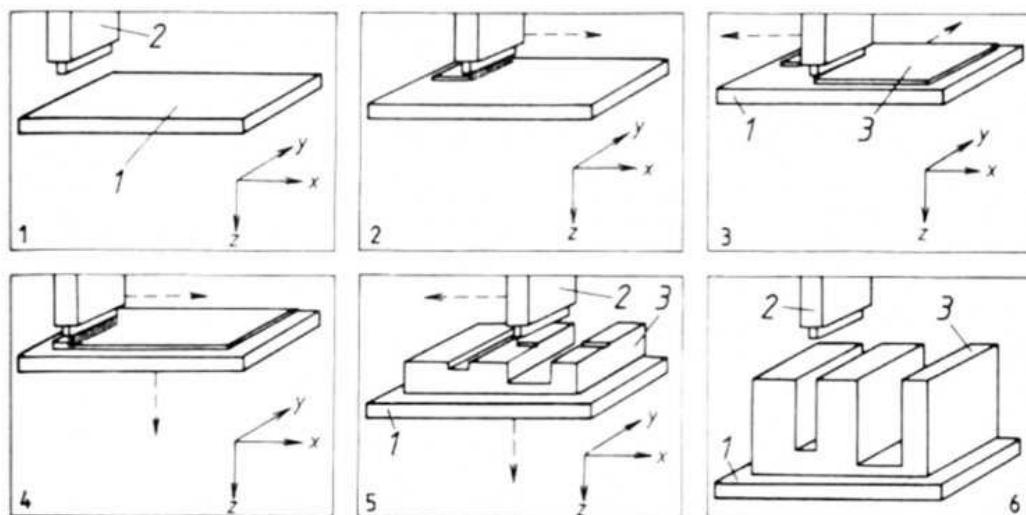
- lze vyrábět i funkční prototypy
- několik druhů používaných termoplastů
- možnost použití barevných plastů
- proces je netoxický
- minimální odpad (pouze materiál podpor)
- nenáročnost zařízení

Nevýhody:

- model nemá stejné mechanické vlastnosti ve všech směrech
- odstraňování podpor
- omezená přesnost daná smršťováním materiálu

2.3.7 Multi Jet Modeling - MJM

Technologie MJM^{11,15,29} byla stejně jako metoda sterilolitografie vyvinuta firmou 3D Systems. Vývoj byl započat v roce 1994. Princip spočívá v nanášení jednotlivých vrstev termopolymeru pomocí speciální tiskové hlavy, která má 352 trysek umístěných vedle sebe v délce 200 mm. Starší provedení má tiskovou hlavu s pouze 96 tryskami. Množství nanášeného materiálu je pro každou trysku řízeno samostatně. Pracovní hlava se pohybuje nad nosnou deskou ve směru osy X. Je-li součást širší než pracovní hlava, posouvá se ve směru osy Y tak, aby se vytvořila celá součást. Velký počet trysek zaručuje rychlé a rovnoměrné nanášení materiálu. Nanášený termoplastický materiál ztuhne při styku s už naneseným materiálem téměř okamžitě.



Obr. 2.11 Schéma zařízení pro technologii MJM (1 – nosná deska, 2 – pracovní hlava, 3 – vyráběná součást)¹⁵.

Výhody:

- jednoduchost
- nízké náklady
- rychlost
- bez škodlivých emisí
- velmi tenké vrstvy materiálu

Nevýhody:

- model nemá stejné mechanické vlastnosti ve všech směrech
- nutnost odstraňování opor
- pouze pro výrobu menších součástí
- omezená volba materiálu
- malá přesnost

2.3.8 Další metody Rapid Prototyping

Mimo zmíněných 7 základních technologií je nutné pro přehled stručně zmínit některé další méně využívané technologie. Některé z těchto technologií vznikly vylepšením původních technologií a jsou jim v principu velice podobné.

- Ballistic Particle Manufacturing (BPM) - technologie spočívá v nástřiku kapek termoplastu pomocí jedné pracovní hlavy pracující na principu inkoustových tiskáren. Je založena na tlakovém nanášení materiálu (termoplastu) ve formě kapek a jejich následném vytvrzení. Nanášení materiálu je docíleno tím, že jednotlivé malé kapky materiálu jsou vystřelovány z tlakové hlavy na pracovní plochu a tam bezprostředně po dopadu vytvrzeny. Technologie BPM pracuje pouze s jednou tiskovou hlavou, která má 5 stupňů volnosti. Tato metoda umožňuje vytvářet modely bez podpůrné konstrukce.
- Model Maker 3D Plotting - Technologie pracuje na stejném principu jako technologie BPM. Narozdíl od BPM pracuje se dvěma tiskovými hlavami, přičemž první nanáší materiál a druhá ho tvaruje.
- Multiphase Jet Solidification (MJS) - podstata technologie spočívá v nanášení zahřátého materiálu tryskou. Materiál je v zásobníku (většinou ve formě prášku, ať již čistého kovu, keramiky nebo směsi kovu, případně keramiky s vhodným pojivem) zahříván na teplotu, při které vytváří nízkoviskózní fázi a je z ní vytlačen pístovým systémem. Při styku s materiálem vyráběné součásti tuhne a vytváří tak požadovanou vrstvu. Celý pracovní cyklus je obdobný jako u technologie FDM. Technologie MJS

umožňuje vyrábět součásti z ušlechtilých ocelí, titanu, siliciumkarbidu, oxidu hliníku, apod.

- Direct Shellt Production Casting (DSPC) - jde o výrobu součástí z keramického prášku. Princip je obdobný jako u technologie SLS. Výchozí materiál (keramický prášek) je však spojován tekutým pojivem. Technologie DSPC je založena na vytváření vrstev nanášením keramického prášku spojovaného tekutým pojivem a jeho následným slinováním paprskem laseru. Nanášení pojiva se provádí pomocí Ink-Jet-tryskové hlavy, jejíž pohyb je řízen počítačem.
- ProMetal 3D Printing - výroba probíhá slinováním práškových materiálů. Metoda je založena na selektivním vrstveném inkoustovém tisku trojrozměrných předmětů z velice jemných kovových, keramických, fermežových nebo kompozitních prášků se speciálními pojivy. Technologie používá principu Ink-Jet počítačových tiskáren a tiskových hlav s vysokým rozlišením. Součástí technologie je i slinování výrobku a jeho infiltrace kovem pro dosažení vysoké pevnosti a téměř 100% hustoty. Při tepelném zpracování dochází k vyhoření pojiva a slnutí kovových prášků na porézní strukturu, která se zpevňuje infiltrací kovu.
- Direct Laser Forming (DLF) - technologie umožňuje přímou výrobu kovových součástí z práškových materiálů. Podstata technologie spočívá ve výrobě součástí postupným nanášením kovového prášku, který je přiváděn do stopy paprsku laseru, kde se taví.
- Genesis 3D Printer - jako materiál se používá polyesterová směs, která je vytlačována hlavou na příslušné místo. Nepoužívá se podpurných struktur ani následného vytvrzování. Součást lze barvit, vrtat a jinak upravovat.
- Solid Imaginig System (SOMOS/Siliform) - jde o podobnou technologii jako SLA. Rozdíl je v opticky aktivním materiálu a laserovém systému. Jako materiál se používá speciální bílá pryskyřice s nízkou hodnotou smršťování a deformace. Její vlastnosti se blíží vlastnostem silikonového kaučuku. Pro vytvrzení se používá argon-iontového laseru s vysokou přesností rastrování a s vysokou rychlostí modulace paprsku.

- Landfoam Topografics - je založena na podobném principu jako LOM. Charakteristické pro tento systém jsou barevné hladiny a selektivní nanášení přílnavého materiálu (adheziva). Selektivní adheze zjednodušuje odstranění přebytečného materiálu.
- Hot Plot - technologie je opět podobná technologii LOM, avšak namísto laseru je zde použito žhavené řezací elektrody. Jako materiál se používají speciální polystyrenové fólie tloušťky cca 1 mm. Nevýhodou je značná měkkost materiálu a malá přesnost, způsobená tloušťkou fólie.
- Design Controled Automated Fabrication (DESCAF) - princip je zčásti podobný jako u SGC.
- Solid Creation System (SCS) - technologie je podobná stereolitografii, avšak technologií SCS lze vyrobit větší součásti.
- Solid Object Ultraviolet Laser Plotting (SOUP) - princip je opět podobný stereolitografii. Použitá pryskyřice má vysokou rozměrovou stálost, vynikající mechanické vlastnosti a nevyžaduje dotvrzení.
- Computer-Operated Laser Active Modeling - princip velmi podobný stereolitografii.
- Stereos - princip výroby je opět téměř shodný se stereolitografií. Rozdíl je pouze v používaných typech laseru. Využívá se HeCd nebo Ar laseru. Tato metoda umožňuje snadnou výměnu vany pro použití různých druhů pryskyřic.
- Incre - je technologie na podobném principu jako BPM, ale součásti jsou vyráběny z kovových materiálů. Výhodou je především možnost vytvářet velké kovové součásti.
- Printed Computer Tomography (PCT) - pracuje podobně jako technologie BPM. Vyznačuje se značnou rychlostí (1 vrstva za minutu).
- Photochemical Machining - je technologie podobná technologii SLA. Využívá 2 protínajících se laserových paprsků, které tak vytvářejí 3D model z bloku fotoaktivního polymeru.
- Three-Dimensional Printing (3DP) - Selektivně spojuje práškový materiál technologií podobnou inkoustovému tisku bez použití laseru.

- Shape Melting - u této technologie je roztavený kov je nanášen pomocí elektrického oblouku po vrstvách a odlit do výsledné součásti. Použitým materiálem jsou slitiny na bázi niklu. Použití této technologie je téměř neomezeno tvarem i rozměrem součásti.
- a další¹⁶.

3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Prakticky jedinou možností jak získat přesný digitální model tak složitého objektu jako je osobní automobil, je použití některé z metod reverzního inženýrství. Pokud bychom se např. pokoušeli nakreslit automobil v některém z CAD programů, bylo by velmi obtížné přesně vystihnout tvary skutečného automobilu, protože jsou tvořeny komplexem složitých křivek a ploch.

Na základě zkušeností pracovníků fakulty a firmy MCAE Systems s.r.o bylo doporučeno ke skenování využít optický systém ATOS, do kterého budou pro zpřesnění načtena data ze systému TRITOP. Pro porovnání však bylo provedeno měření i bez TRITOPu. Předmětem skenování byl automobil Škoda Octavia II RS zapůjčený Ústavem automobilního a dopravního inženýrství. Automobil byl darován škole společností Škoda Auto ke studijním účelům, jako již nezpůsobilý provozu na pozemních komunikacích, neboť pochází z ověřovací série a byl podroben zátěžovým testům. K našim účelům však plně vyhovuje. Měření proběhlo v prostorách VUT.

3.1 Měření systémem ATOS

K měření byl použit systém ATOS II 400 (1. generace) zapůjčený firmou MCAE. Stávající školní vybavení v podobě systému ATOS Standard je již staršího data výroby a měření a zpracování dat by s ním bylo časově mnohem náročnější.

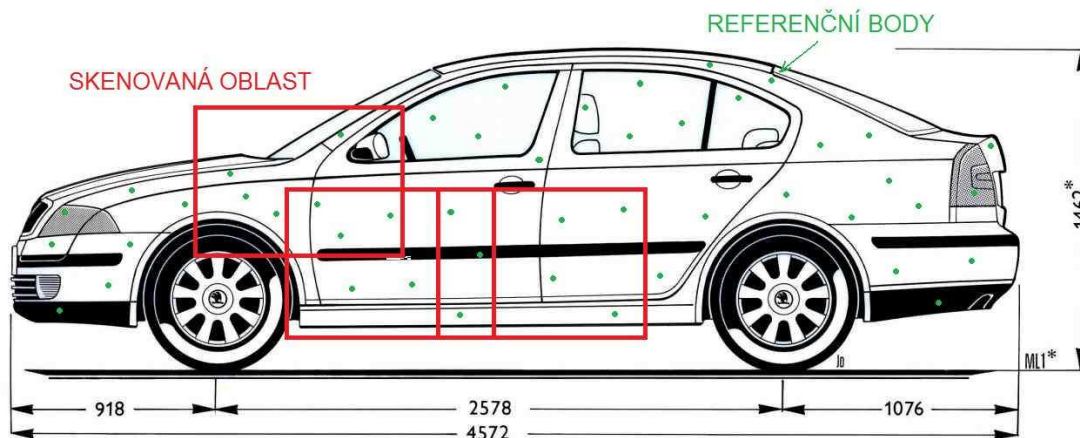
3.1.1 Popis systému ATOS II 400

Zařízení ATOS II 400 je mobilní optický 3D skener vyvinutý firmou Gom. Zařízení je průběžně modernizováno a vznikají tak různé evoluční stupně. V našem případě se jedná o 1. generaci tohoto zařízení. Měření se všemi systémy ATOS je založeno na principech optické triangulace,

fotogrammetrii a fringe projection (promítání pruhů). Na povrch skenovaného objektu jsou pomocí projektoru a soustavy clon promítány pruhy světla, které se na povrchu objektu zdeformují podle tvaru objektu. Tyto pruhy jsou následně snímány pomocí dvou CCD kamer. Software pomocí složitých algoritmů vypočítá prostorové souřadnice jednotlivých bodů. Většinu součástí není možné změřit na jeden záběr a proto se musí těleso snímat z několika směrů a úhlů. Aby došlo k provázání jednotlivých snímků je povrch tělesa opatřen referenčními značkami, kterých musí být tolik, aby na navazujícím snímku byli minimálně 3 body z předchozí oblasti, jak je patrné z obr. 3.1. Pro efektivní měření je potřeba minimálně 2 členná obsluha. Jeden pracovník obsluhuje vlastní zařízení a druhý pracuje s výpočetní stanicí. Modernější systémy ATOS vybavené dálkovým ovladačem může pohodlně obsluhovat jen jedna osoba. Přesnost měření záleží na zkalibrování systému, ale řádově se pohybuje okolo 50 μm . Se vzrůstající velikostí objektu se však přesnost snižuje. Cena systému ATOS II se v závislosti na konkrétní sestavě pohybuje okolo 90 000 €.

Parametry systému ATOS II 400 (1. generace):

naměřené body na 1 záběr	až 1 400 000
čas měření	1 s
měřicí objem (d x š x v)	od 135x108x95 do 1700x1360x1360 mm
vzdálenost mezi body	0,11 až 1,33 mm



Obr. 3.1 Navazování jednotlivých snímků u systému ATOS.

Zařízení ATOS se skládá z:

- vlastního měřicího zařízení (projektor + 2 CCD kamery)
- stojanu
- kalibračního příslušenství
- výpočetní stanice s příslušným softwarem
- referenčních bodů
- sady měřících objemů

Celá sestava je uložena v hliníkových kufrech a je tak ochráněna proti poškození během přepravy, kterou je možné provádět běžným osobním automobilem.

Výstupy ze systému ATOS:

- mrak bodů (cloud of points)
- optimalizovaná polygonální síť STL
- řezy
- obrysové a kontrastní křivky
- barevná mapa odchylek
- protokol měření (HTML, Word, PDF)¹⁰

3.1.2 Příprava ke skenováníPřed započítím vlastního měření je potřeba provést:

- úpravu povrchu skenovaného objektu a s tím související operace
- nanést referenční body
- provést instalaci a kalibraci systému

Systém ATOS II stejně jako jeho předchůdci ATOS I a ATOS Standart mají problémy se skenováním průhledných a lesklých povrchů. Skenovaný

automobil byl lakován stříbrným metalickým lakem, což nebylo pro naše účely ideální. Z tohoto důvodu muselo být přistoupeno k zmatnění povrchu.

Zmatnění je možné provést pomocí několika způsobů, přičemž v úvahu připadali 3 varianty. A to použití speciálního křídového spreje, křídového prášku rozředěným v přípravku AG Likal na lihové bázi nebo speciální vývojky. Poslední 2 prostředky je třeba nanášet stříkací pistolí.

Křídový sprej ENTWICKLER

Výhody: - rychlost práce

- rychlost schnutí

Nevýhody: - nízká otěruvzdornost

- ref. body na povrchu nedrží a musí se nanést před nástřikem a následně očistit

- cena

Křídový prášek rozředěný přípravkem AG Likal

Výhody: - cena

- rychlost schnutí

Nevýhody: - nízká otěruvzdornost

- ref. body na povrchu nedrží a musí se nanést před nástřikem a následně očistit

Vývojka ARDROX 9D75L

Výhody: - otěruvzdornost

- omyvatelnost

- body je možné nanést až na vývojku ⇒ není je třeba očistit

Nevýhody: - cena

- pomalejší zasychání (přípravek je na vodní bázi)

Po zvážení všech pro a proti bylo rozhodnuto použití vývojky. Nanesení se provádělo stříkací pistolí, přičemž bylo spotřebován asi 1litr. Aby se zabránilo vniknutí vývojky do spár a dutin automobilu byly veškeré tyto otvory zamaskovány malířskou zakrývací páskou. Celkem bylo použito téměř 100 m pásky. Nezakryté zůstaly pouze pravé dveře, aby bylo možné s autem manipulovat, jelikož vývojku bylo nutné nanášet v exteriérech. Po proschnutí první vrstvy (cca 1 hodina) byla nanesena druhá vrstva.



Obr. 3.2 Nanášení 1. vrstvy vývojky.

Po dokonalém proschnutí vývojky bylo přistoupeno k nalepení přiměřeného počtu referenčních bodů, což vzhledem k použitému způsobu zmatnění nebyl problém, protože odpadlo pracné čišťení řádově stovek bodů.

Instalace systému je poměrně jednoduchá. Stačí umístit skenovací hlavu na stojan, propojit ji s výpočetní stanicí a nakonec zvolit a nasadit předsádky (měřicí objemy) CCD kamer a projektoru. Možnost vyměnit tyto měřicí objemy zajišťuje větší univerzálnost použití. V případě volby nejmenšího měřicího objemu je možné měřit malé objekty a naopak v případě největšího objemu je možné zabrat objekty mnohonásobně větší. Námi použitá konfigurace umožňuje použití měřicího objemu až 1700 x 1360 x 1360 mm. Tuto sadu čoček jsme však neměli k dispozici a

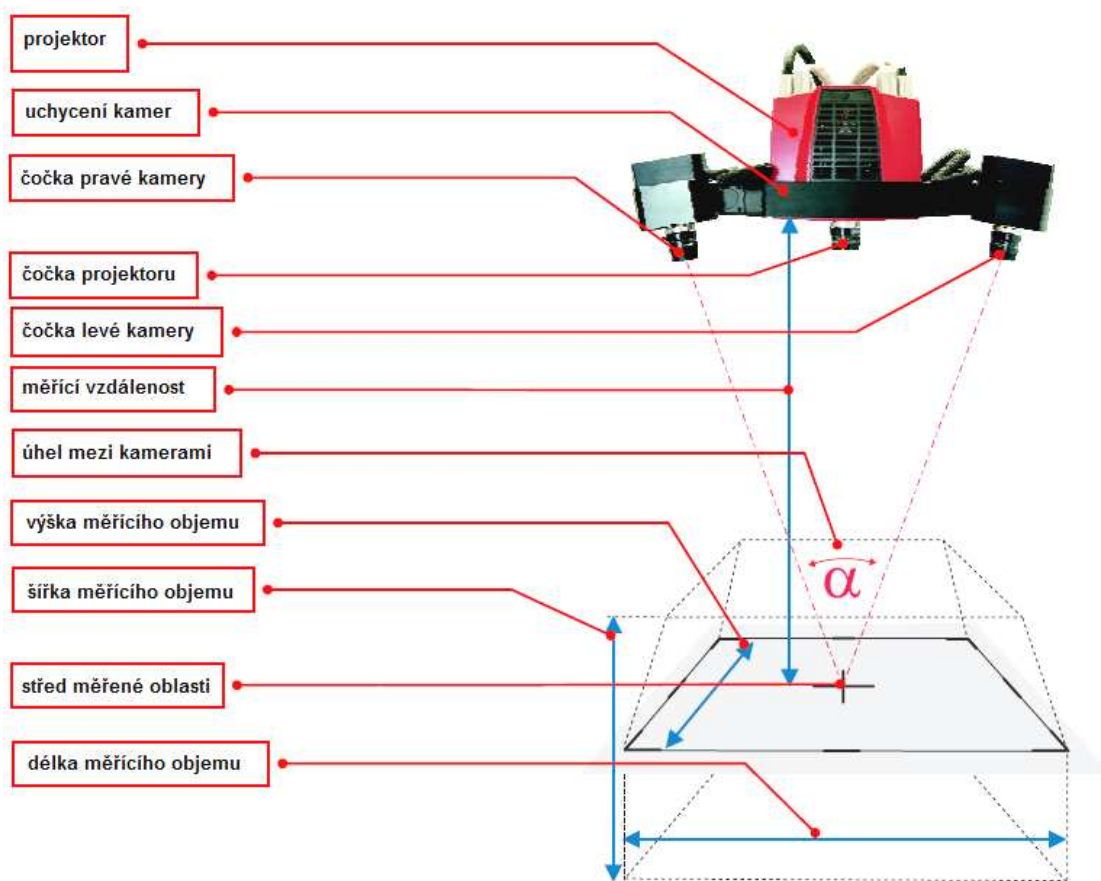
proto byl vybrán největší dostupný měřicí objem (800 x 640 x 640 mm). Montáž objektivů je jednoduchá, stačí je našroubovat a zajistit. Přehled všech dostupných měřicích objemů viz. tab. 3.1.



Obr. 3.3 Měřicí objemy (podle³³).

měřicí objem (d x š x v) [mm]	kalibrační objekt [mm]	hustota naměřených bodů [mm]	doporučený ϕ ref. bodů [mm]	ohnisková vzdálenost (projektor) [mm]	ohnisková vzdálenost (kamera) [mm]	úhel mezi kamerami α	kalibrační vzdálenost [mm]
1700x1360x1360	kříž 1700	1,33	12,0	6	8	14°	1600
1200x960x960	kříž 1200	0,94	12,0	6	8	22°	1120
800x640x640	kříž 800	0,62	8,0	8	12	30°	750
550x440x440	kříž 550	0,43	5,0	8	12		
350x280x280	panel 350x280	0,27	3,0	12	17		
250x200x200	panel 250x200	0,20	3,0	17	23		
175x140x135	panel 175x140	0,14	1,5	23	35		
135x108x95	panel 135x108	0,11	1,5	35	50		

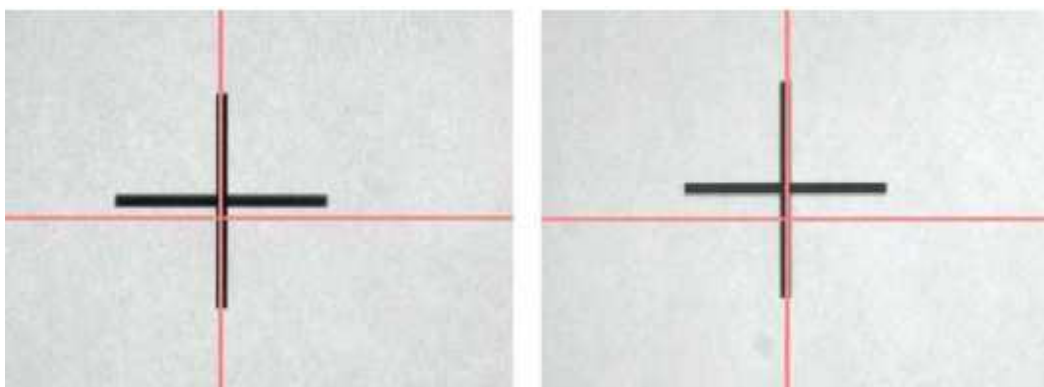
Tab. 3.1. Konfigurace systému ATOS II 400 (podle³³).



Obr. 3.4 Parametry systému ATOS (podle³⁴).

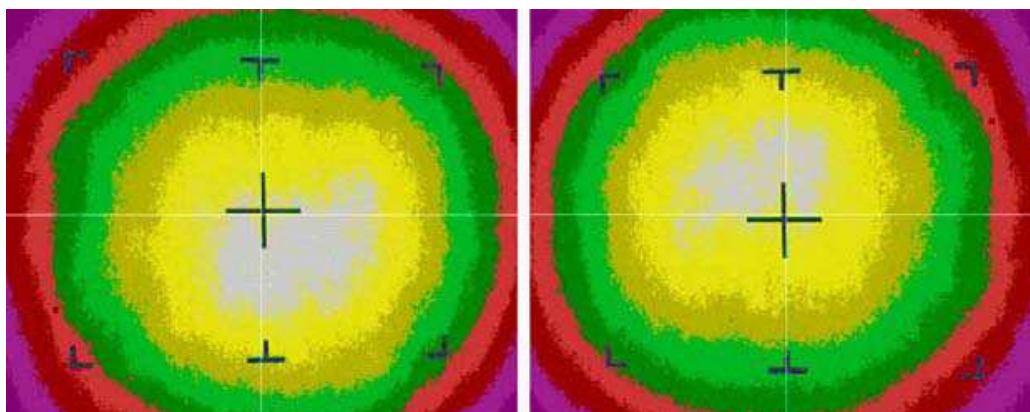
Posledním krokem před vlastním měřením byla kalibrace systému. Pro menší měřicí objemy je kalibrace realizována pomocí kalibračního panelu (viz tab. 3.1). Pro větší objemy se kalibrace provádí pomocí kalibračního kříže, což byl i náš případ.

Proces kalibrace začíná odcloněním kamer, tzn. nastavením plné světelnosti objektivu, s cílem získat maximum optického výkonu. Poté je hlava systému ATOS natočena kolmo k zemi ve vzdálenosti, která vyplývá z tab. 3.1, t.j. 1120 mm. Na bílou podložku je promítán rovnoramenný kříž. Je-li nastavení úhlu kamer správné prochází červený nitkový kříž u levé i pravé kamery ve vertikální rovině skrz promítaný kříž (obr. 3.5).



Obr. 3.5 Kontrola správného úhlu nastavení kamer³³.

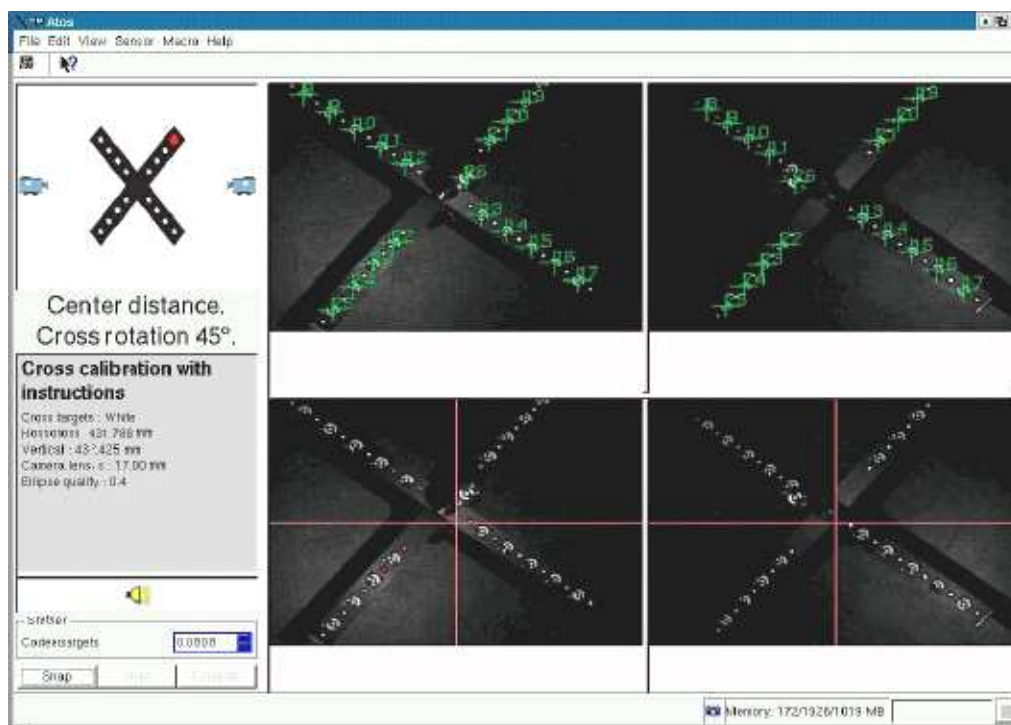
Následně je nutné nastavit zaostření obou kamer a nastavit nasvětlení objektivů. To je prováděno tak, že kamery zobrazují na obrazovce monitoru záběry ve spektrálním módu (obr. 3.6). Pokud je ve spektru viditelná bílá barva znamená to, že objektiv je přesvětlen. Naopak tmavě modrá barva znamená podexponování záběru. Ideální stav je pokud se na záběru vyskytuje v co největší míře žlutá barva. Vzhledem k tomu, že světelné podmínky se během následujícího měření mohou měnit, je možné nastavení světelnosti upravovat i během skenování.



Obr. 3.6 Nastavení nasvětlení objektivů³³.

V poslední části kalibrace je potřeba nasnímat kalibrační kříž v různých polohách. Podle instrukcí na obrazovce se tento kříž ručně otáčí o požadovaný úhel v horizontální i vertikální rovině. Jedná se o poměrně složitou a zdlouhavou práci. Výstupem z kalibrace je kalibrační protokol, který obsahuje několik hodnot, z nichž nejdůležitější je kalibrační odchylka. Zařízení

je považováno za zkalibrované pokud je dosažená hodnota kalibrační odchylky menší než 0,4, což se povedlo až na druhý pokus. V našem případě bylo potřeba kalibraci znovu provést po naskenování cca poloviny automobilu.



Obr. 3.7 Proces kalibrace v prostředí softwaru ATOS.



Obr. 3.8 Kalibrace systému v praxi.

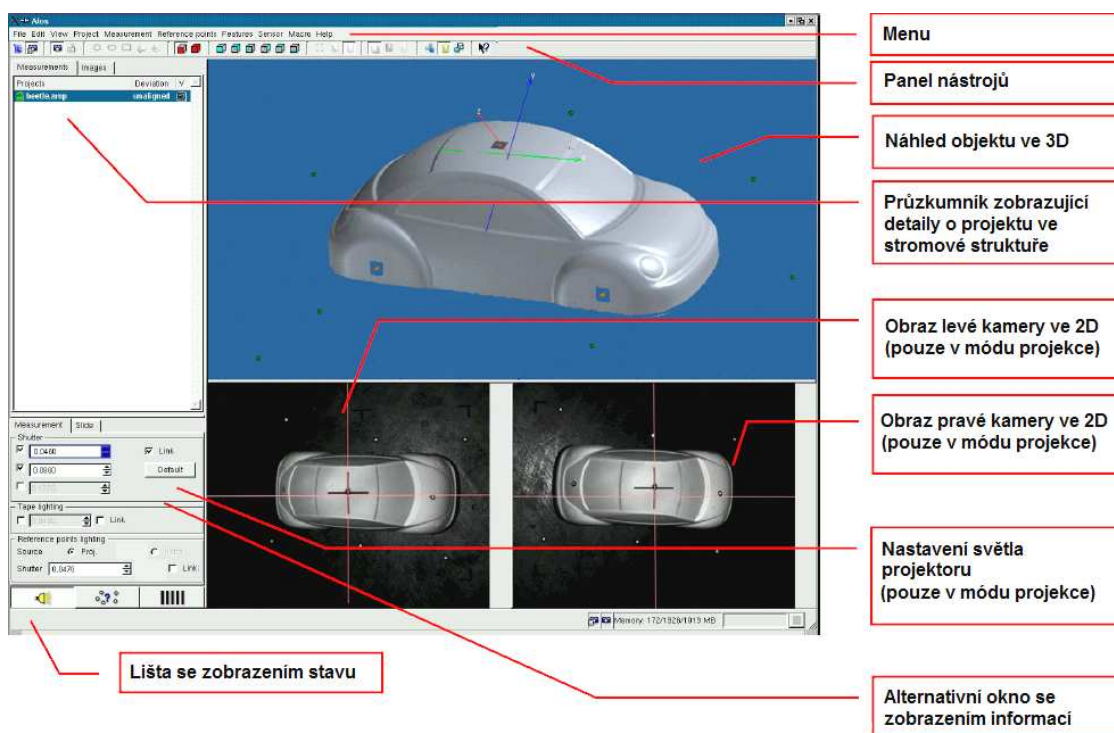
3.1.3 Vlastní měření

Ihned po zkalibrování systému bylo možné přikročit k vlastnímu skenování. Již při pořízení prvního snímku se projevila závada na projektoru, která byla způsobena vadnou žárovkou. Její výměna přinesla zdržení okolo 15 minut. Poté byl již pořízen první snímek v oblasti levého zadního blatníku, dále se postupovalo po směru hodinových ručiček až do oblasti pravého předního světlometu. Naskenována byla tedy zhruba polovina automobilu. Poté se z důvodu krátké kabeláže snímala druhá polovina automobilu v opačném směru. K navázání skenů tedy došlo právě v oblasti pravého předního světlometu. Na závěr byla skenována střecha a přední a zadní sklo. Některé skeny nebyly z důvodu nízké přesnosti softwarem akceptovány a musely být pořízeny znovu. Nepřesnosti byly způsobeny zejména proměnlivými světelnými podmínkami během měření (např. dopad stínu pohybujících se osob na oblast skenování) a vibracemi (přenos chvění z podlahy).



Obr. 3.9 Proces vlastního měření systémem ATOS

Celkem bylo provedeno 130 skenů, jejichž pořízení trvalo přibližně 5 hodin. Skener obsluhovaly střídavě 3 až 4 osoby (studenti) bez předchozích zkušeností se podobnými systémy. Pokud by skener obsluhovala zkušenější obsluha, byl by proces o něco kratší. Dle slov odborníků z firmy MCAE by na digitalizaci automobilu stačilo asi 50-60 skenů. Kompletní časový plán včetně přípravy, vlastního skenování a dalších procesů je zmíněn v tab. 3.2.



Obr. 3.10 Pracovní prostředí softwaru ATOS (ilustrační foto)³⁴.

3.2 Měření systémem TRITOP

Měření systémem TRITOP bylo z technických důvodů realizováno až následujícího dne. Digitální zrcadlovka a výpočetní jednotka (notebook) pocházející ze školního vybavení, byly doplněny referenčními body, kalibračními tyčemi a referenčními kříži zapůjčenými opět firmou MCAE Systems.

3.2.1 Popis systému TRITOP

Systém TRITOP je dalším ze skupiny optických snímacích systémů. Pracuje na principu tzv. fotogrametrie. Na rozdíl od systému ATOS systém nezkoumá povrch skenovaného objektu, ale pouze souřadnice jednotlivých referenčních bodů v prostoru. Přibližné informace o povrchu tělesa je možné získat pouze výpočtem podle normál jednotlivých bodů. Pomocí TRITOPU lze skenovat objekty prakticky neomezených rozměrů.

Jak systém ATOS tak i TRITOP byly vyvinuty firmou GOM mbH a jsou vzájemně kompatibilní. Naměřené polohy referenčních bodů je možné načíst do systému ATOS, čímž dojde ke zrychlení a zejména ke zpřesnění měření. Oba systémy se tak vzájemně doplňují. Cena systému TRITOP v závislosti na provedení začíná na 33 000 €.

Zařízení TRITOP se skládá z:

- kalibrovaného digitálního fotoaparátu (zrcadlovky) s makrobleskem
- výpočetní stanice (notebooku)
- sady kódovaných bodů
- kalibračních tyčí
- případně referenčních křížů

Možnosti systému TRITOP:

- dosahovaná přesnost: 0,02 - 0,4 mm
- teplota měřeného objektu až 180°C
- velikost měřeného objektu: prakticky neomezená

Základní parametry použitého fotoaparátu:

- jednooká digitální zrcadlovka Fujifilm Finepix S2pro
- rozlišení: 6,49 Mpix
- citlivost: ISO 100-1600
- doba uzávěrky: 30-1/4000s
- objektiv: NIKKOR 24 mm 1:2,8
- typ paměťové karty: SmartMedia nebo CompactFlash
- výstupní formáty: JPEG, TIFF-RGB (8bit), CCD-Raw (12bit)

3.2.2 Příprava ke skenování

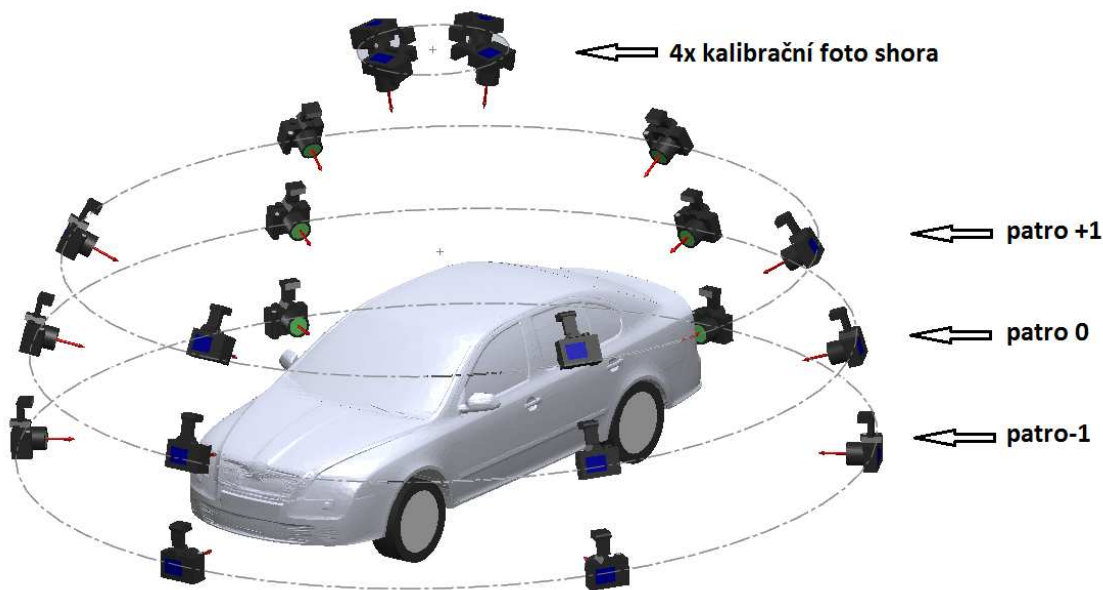
Oproti systému ATOS je příprava velmi jednoduchá. Není třeba nijak upravovat povrch. Zmatnění na obr. 4.6 je pozůstatek ze skenování ATOSem a není pro toto měření již potřeba. Na povrch stačí pouze nalepit potřebný počet kódovaných referenčních bodů, z nichž každý je označen originálním číslem, které se nesmí vyskytnout 2x. Dále je potřeba umístit referenční kříže a po obou stranách automobilu položit kalibrační tyče. Tím je příprava hotová a je možné přistoupit k měření.



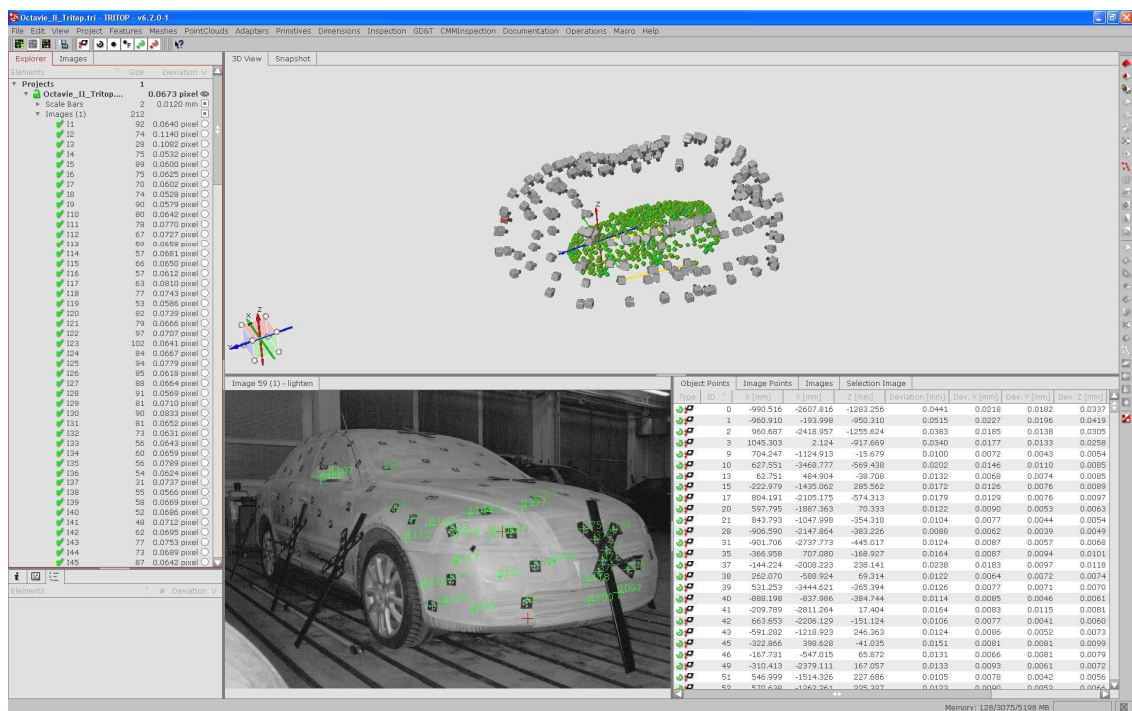
Obr. 3.11 Automobil připravený na skenování systémem TRITOP.

3.2.3 Vlastní měření

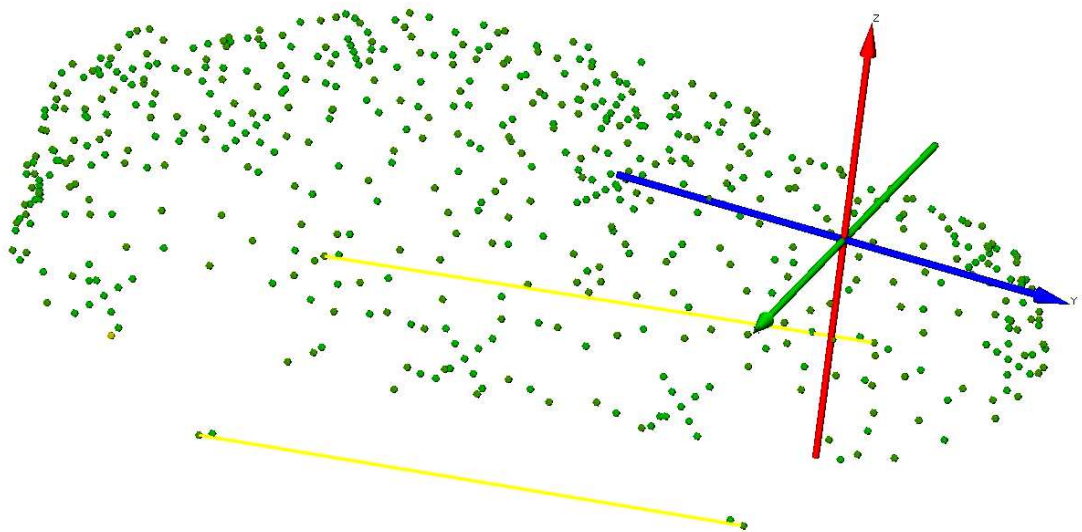
Měření je opět podstatně jednodušší a rychlejší než se systémem ATOS. Stačí udělat libovolný počet snímků tak, aby se všechny body na objektu vyskytly alespoň na 3 snímcích. Referenční bod je rozpoznán, jestliže je jeho střed zachycen alespoň 10 pixely na snímku. Součástí několika snímků musí být i kalibrační tyč. Automobil byl fotografován v soustředných kružnicích ve 3 úrovních, jak ukazuje obr. 3.12 Pořízené fotografie poté byly pomocí paměťové karty přeneseny do notebooku se speciálním softwarem, který dokáže vyhodnotit prostorové souřadnice bodů a podle kalibrační tyče vypočítat vzdálenosti mezi jednotlivými body. Výstupem je soustava 3D bodů, které byly, jak již bylo zmíněno, nahrány do systému ATOS. K obsluze zařízení postačuje jednočlenná obsluha. Skenování včetně přípravy a vyhodnocení trvalo asi 1,5 hodiny.



Obr. 3.12 Způsob měření systémem TRITOP.



Obr. 3.13 Prostředí obslužného softwaru TRITOP v 6.2.0.2.



Obr. 3.14 Výstup ze systému TRITOP.

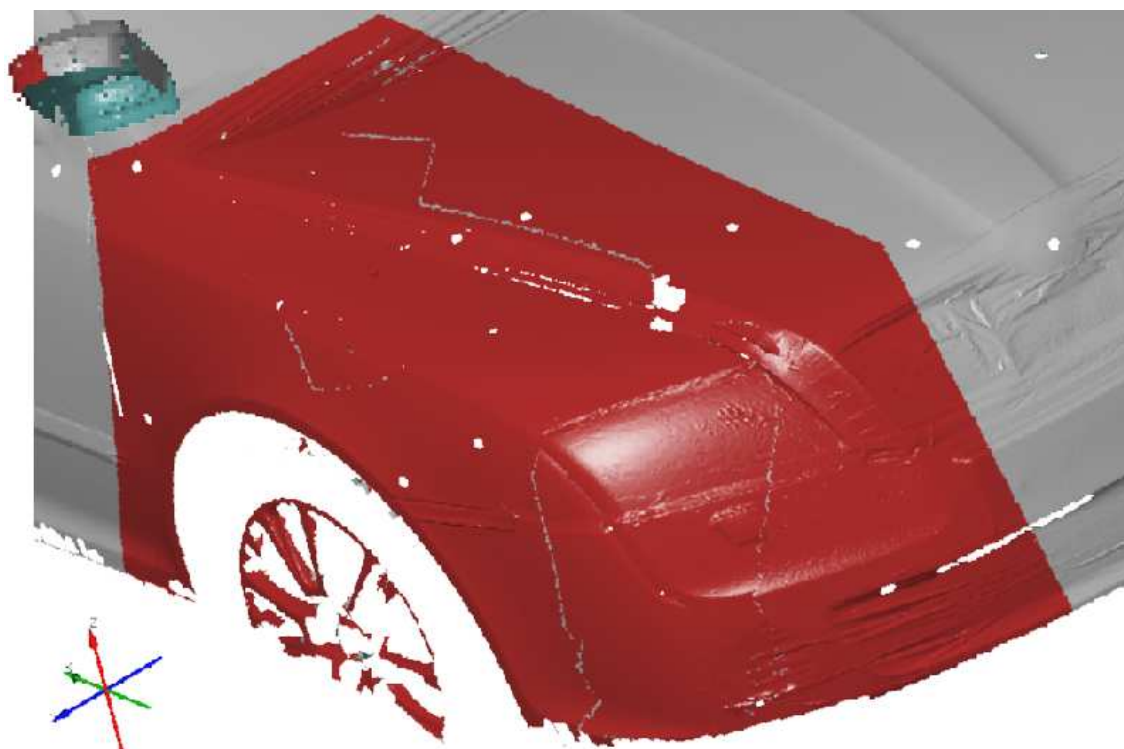
Operace	čas [min]
mytí auta	10
zalepení spár a otvorů malířskou páskou	90
nanesení vývojky (2 vrstvy)	30
nalepení referenčních bodů (ATOS)	60
instalace systému ATOS	15
kalibrace systému ATOS (celkem 3x)	60
skenování (ATOS)	300
nalepení referenčních bodů, instalace kalibračních tyčí a křížů (TRITOP)	30
pořízení snímků (TRITOP)	30
zpracování dat (TRITOP)	60
úklid pracoviště	30
odstranění pásky a omytí vývojky	90
Σ	13 hod 25min

Tab 3.2 Shrnutí časů měření systémy ATOS i TRITOP

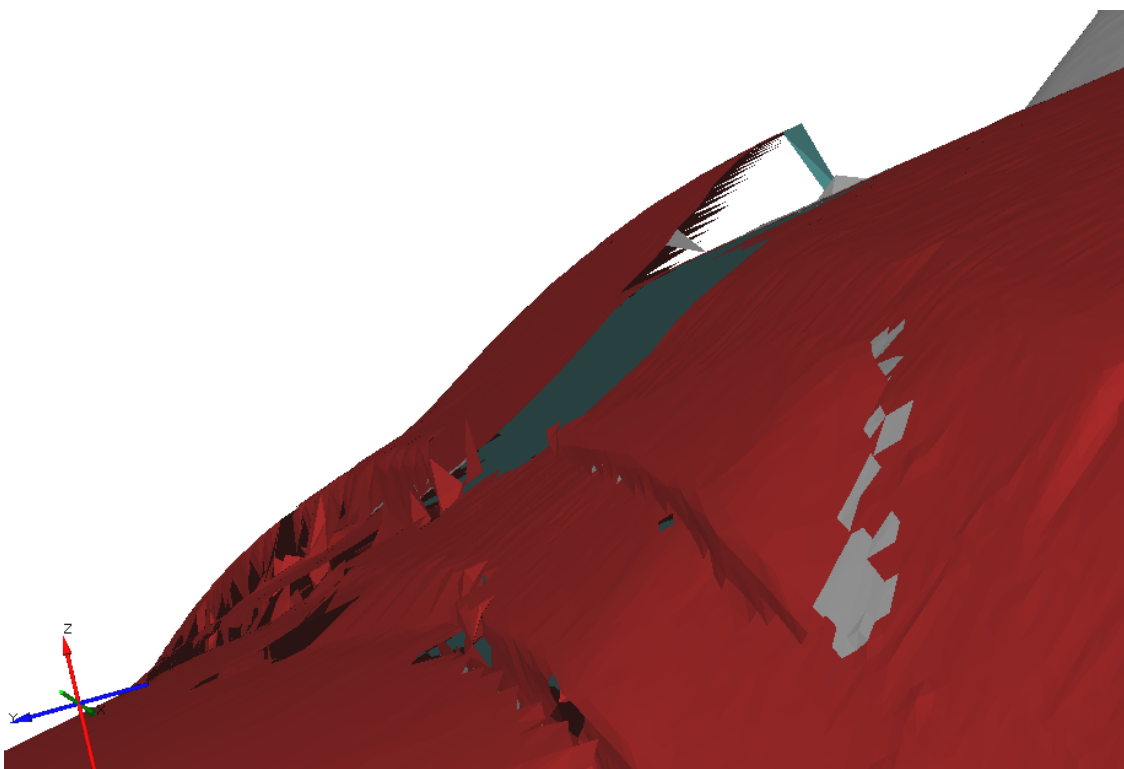
3.3 Zpracování získaných dat

Jak již bylo řečeno v úvodu, skenování bylo provedeno jak samotným systémem ATOS tak i kombinací obou systémů za účelem srovnání. V případě použití samostatného systému ATOS byla očekávána výrazně nižší přesnost. Prvotní zpracování získaných dat bylo provedeno ve firmě MCAE panem Ambrózem Bothem. Data totiž nebylo možné zpracovat na běžném PC, ale bylo nutné využít výkonné 64 - bitové výpočetní centrum.

V kapitole 3.1.3 bylo zmíněno, že k navazování skenů došlo v oblasti pravého předního světlometu a přechodu blatník - kapota. Právě v této oblasti došlo při softwarovém napojování skenů k poměrně velkým nepřesnostem (platí pouze pro skenování bez TRITOPu). Největší odchylka těchto "rozjetých" skenů byla kolem 12 mm, což je neakceptovatelné. Po další softwarové úpravě použitím funkce „align“ byla tato odchylka snížena až na 3,27 mm. Taková přesnost by již pro některá odvětví (netechnická) byla přijatelná, nicméně v oblasti strojírenství je to stále velká odchylka.

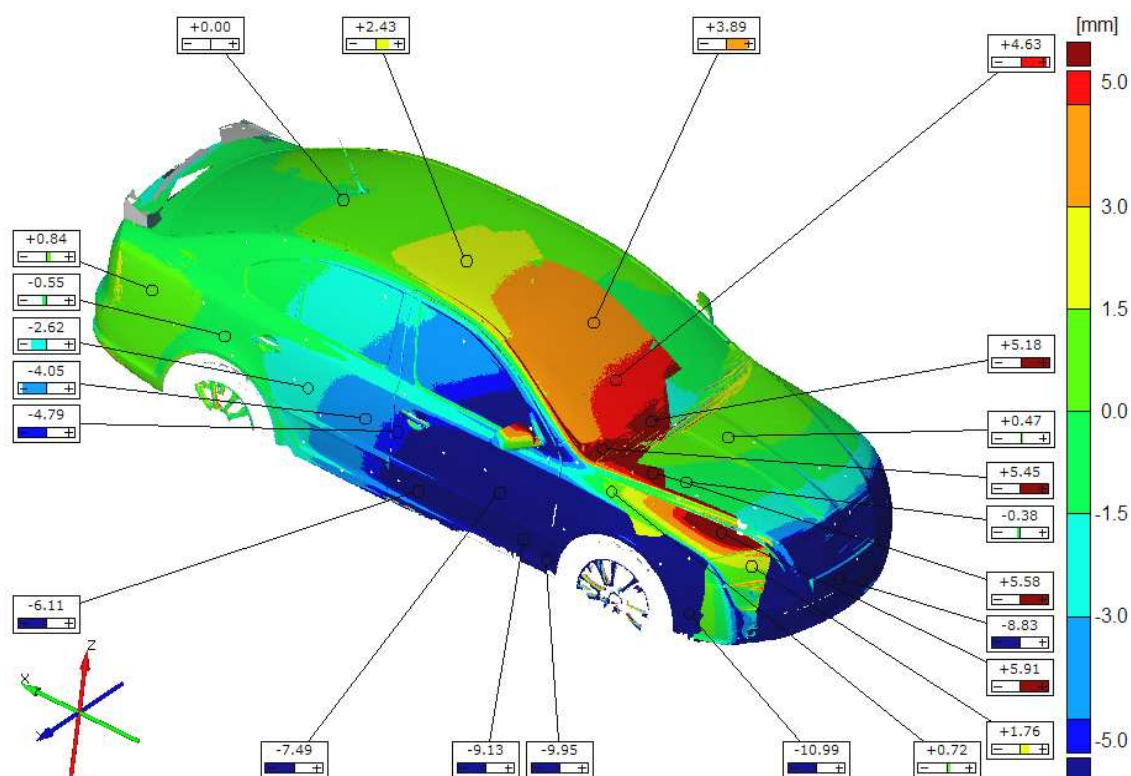


3.15 Oblast nepřesného napojení skenů.



Obr. 3.16 Detailní pohled na nepřesné napojení skenů v oblasti přechodu blatník - kapota po úpravě funkcí „align“.

Dále bylo provedeno vyhodnocení dat při použití obou systémů. Díky načteným polohám referenčních bodů ze systému TRITOP se celková přesnost zvýšila na 0,051 mm a zcela odpadl problém s navazováním skenů. Místa, kde při porovnání obou metod dochází k největším odchylkám, ukazuje barevná mapa odchylek (obr.3.14).



Obr. 3.17 Barevná mapa odchylek při použití bez a s TRITOPem.

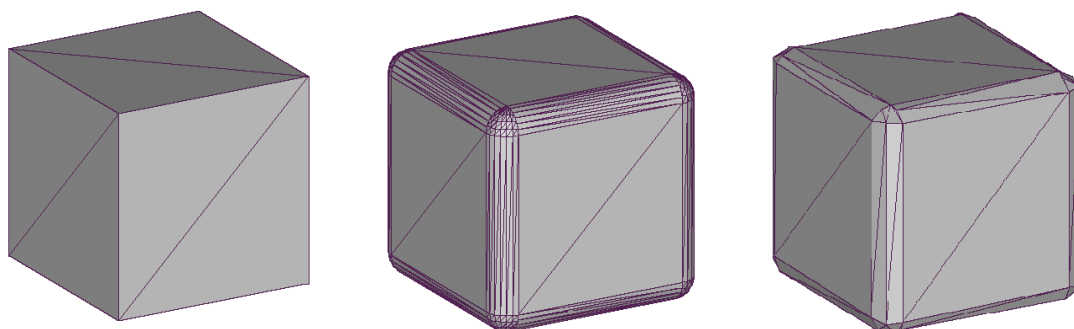
Z porovnání vyplývá, proč se doporučuje použít pro rozměrné objekty kombinace systémů ATOS a TRITOP. Největší odchylky dosahují hodnot téměř +6 mm až -11 mm. Pokud by nebyl systém TRITOP k dispozici, museli bychom pro zpřesnění změnit postup skenování, tak aby se jednotlivé skeny lépe provázaly.

Dosažené přesnosti:

- TRITOP 0,012 mm
- ATOS+TRITOP 0,051 mm

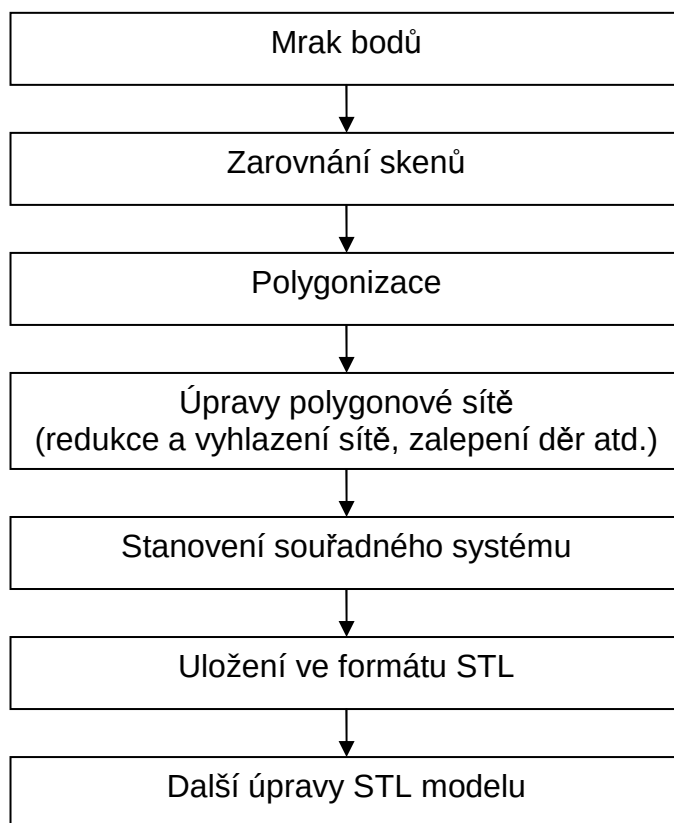
Dále byla zpracovávána již pouze data získaná kombinací systému ATOS a TRITOP. Po nezbytném zarovnání skenů (funkce „align“) a načtení bodů z TRITOPU byla provedena polygonizace, neboli vytvoření trojúhelníkové sítě (formát dat STL).

Tělesa ve formátu STL jsou popsána jako soubor informací o povrchu bez jakýchkoliv zbytečných informací o struktuře, barvě povrchu apod. Povrch součásti je v případě STL tvořen sítí trojúhelníků (fazetek). Každý z trojúhelníků je popsán 3 body a normálou. V závislosti na nastavení hustoty sítě vzrůstá kvalita povrchu, ale současně se také zvětšuje velikost souboru a proto je důležité zvolit optimální hustotu sítě. Na obr. 3.18 je na jednoduchém příkladě ukázána aproximace krychle do formátu STL. Vlevo je krychle s hranou délky 10 mm a je tvořená 12 trojúhelníky, přičemž zabírá 684 bajtů paměti. Uprostřed je pak krychle stejné velikosti, avšak hrany jsou na ní zaobleny R1. Výsledný soubor však zabírá již 29 484 bajtů a obsahuje 588 trojúhelníků. U krychle úplně vpravo je provedena redukce počtu trojúhelníků. Výsledný soubor sice obsahuje jen 91 trojúhelníků a má velikost 4 643 bajtů, ale výsledná kvalita je již velmi nízká. Je proto důležité zvolit optimální kvalitu síťování. Aproximaci povrchu do formátu STL umožňuje většina CAD systémů.



Obr. 3.18 Aproximace krychle do formátu STL

Prvotním výstupem ze systému však není formát STL, ale pouze tzv. mrak bodů, který je po zarovnání skenů (tzv. „alignování“) teprve na formát STL převeden. Tento proces se nazývá polygonizace. Export do výměnného formátu STL u takto velkého objektu je poměrně složitý a náročný na výpočetní výkon.



Obr. 3.14 Postup zpracování dat a exportu do formátu STL

Proces exportu do formátu STL zahrnoval tyto úpravy:

- vyhlazení (funkce „smooth“) na 0,1 mm
- redukce sítě (funkce „thining“), parametry 0,01/2 mm*
- zalepení děr (funkce „filling“) a odstranění nežádoucích ploch a přebytečných částí (kola, křídlo atd.)
- opětovné vyhlazení na 0,1 mm
- redukce, parametry 0,02/20 mm
- stanovení souřadného systému 3-2-1 transformacemi

* první hodnota (0,01 mm) znamená maximální povolenou změnu na tvaru skenu, druhá hodnota (2mm) vyjadřuje maximální povolenou hodnotu délky strany trojúhelníku. První i druhé kritérium je limitující. První je splněno vždy. Druhé omezující kritérium nastane jen na málo zakřivených místech.



Obr. 3.19 Výstup ze softwaru ATOS ve formátu STL.

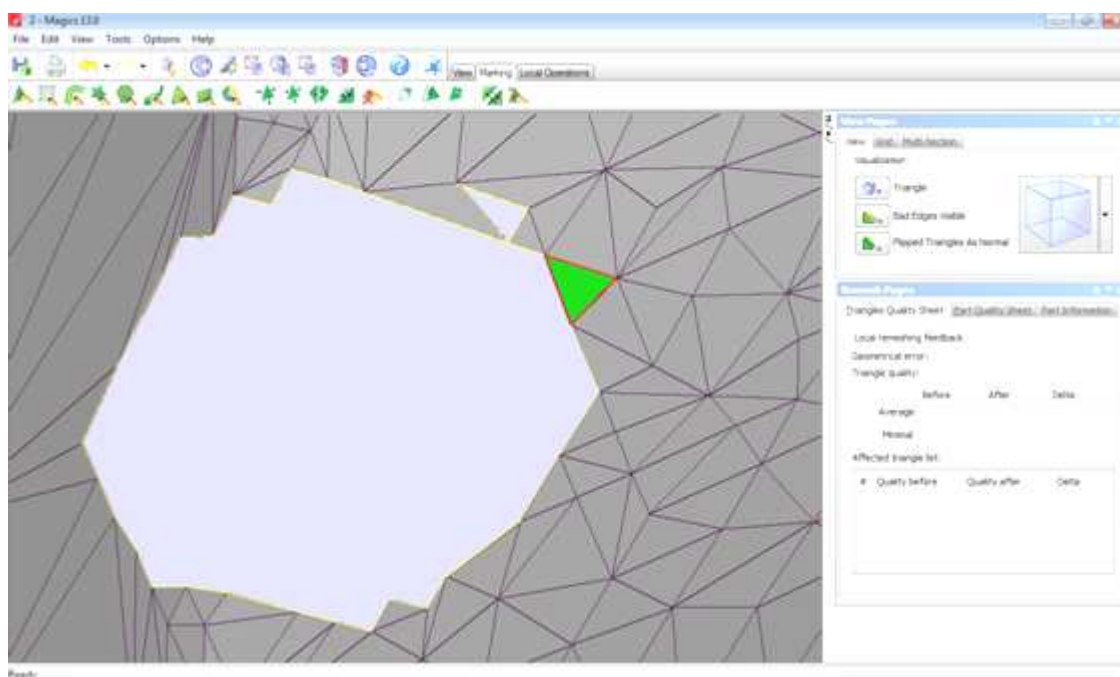
Práce v obslužném softwaru systému ATOS v 6.2.0.2 trvaly panu Bothovi cca 4 hodiny. Výsledný soubor zabírá 61,9 MB paměti a obsahuje 3 896 670 vrcholů a 1 298 890 trojúhelníků. S tímto souborem je již možné pracovat na běžném počítači.

3.4 Další úpravy modelu

Další úpravy již byly provedeny v domácích podmínkách na běžném PC ve specializovaném softwaru Materialise Magics 13.0, který je určen hlavně pro úpravy a opravy STL dat. Především bylo potřeba vytvořit uzavřený model, neboť se při načtení původního modelu (ze softwaru ATOS) do obslužného softwaru k 3D tiskárně - CatalystEX došlo k blíže nespecifikované chybě. Uzavřením ploch byl tento problém odstraněn. Dále byly při zpracování dat zjištěny drobné nepřesnosti ve stanovení souřadného systému. K přesnému stanovení souřadného systému by bylo zapotřebí příslušenství k systému TRITOP v podobě adaptéru k zaměření RPS (Reference Point System). RPS

označuje 4-6 referenčních bodů umístěných zespodu v podlaze karoserie. Poloha těchto bodů je po celou dobu výroby automobilu neměnná a je používána zejména k ustavení karoserie na svařovací a montážní lince. Příslušenství k zaměření RPS bohužel nebylo k dispozici.

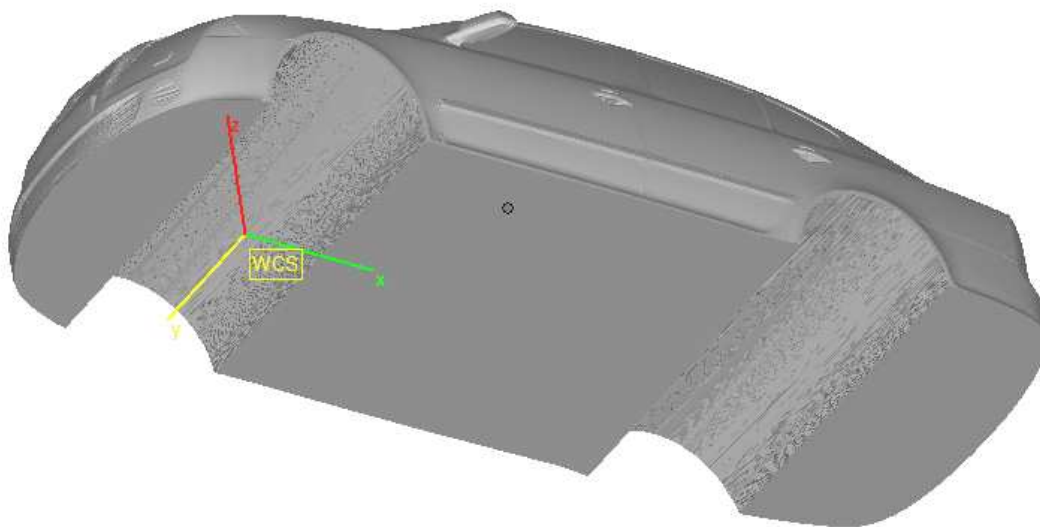
Práce v programu Magics byly nenáročné, ale velmi zdouhavé. Níže uvedené úpravy trvaly celkem asi 20 hodin.



Obr. 3.20 Práce s STL souborem v programu Materialise Magics 13.0.

Práce v softwaru Magics zahrnovaly:

- ořezání přebytečných trojúhelníků v oblasti prahů a obou nárazníku
- doplnění chybějících polygonů
- odstranění antény na střeše
- zaslepení zbývajících děr po referenčních bodech
- opravy chybných trojúhelníků
- zaslepení karoserie v oblasti podběhů
- drobné úpravy povrchu
- a další



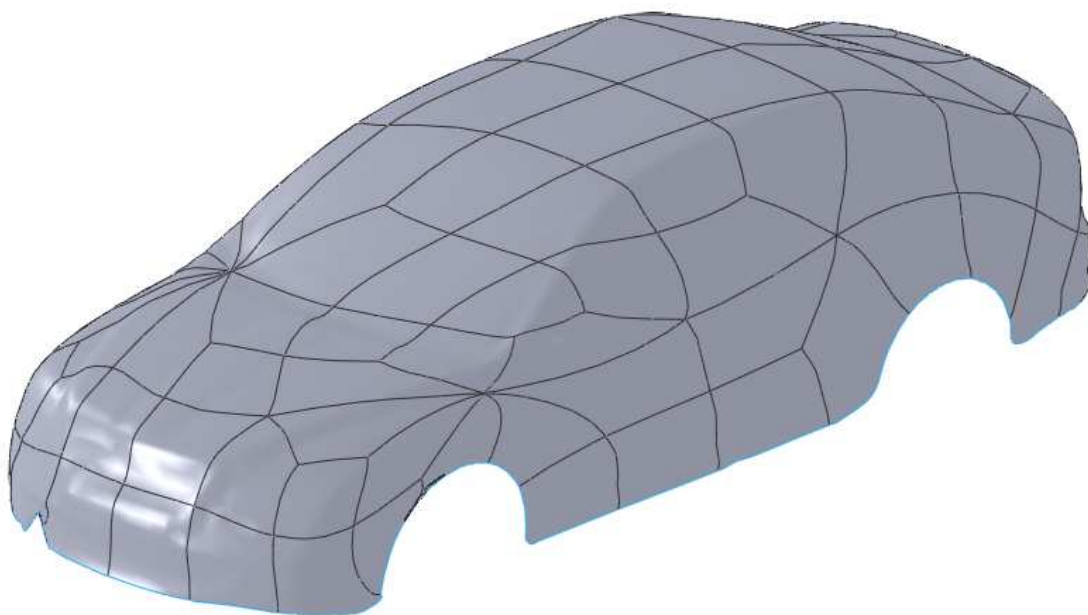
Obr. 3.21 Uzavření ploch v programu Magics – finální podoba modelu pro tisk

Takto upravený soubor ve formátu STL je již použitelný pro 3D tisk a proto tento model již nebude dále upravován a můžeme jej označit za finální. V praxi však nastávají případy, kdy je potřeba se získaným daty dále pracovat a upravovat. Formát dat STL je pro tyto úpravy nevhodný. V takových případech je nutné převést model na plošného či objemového modeláře, se kterým je možné pracovat v 3D CAD systémech (Catia, SolidWorks, apod.).

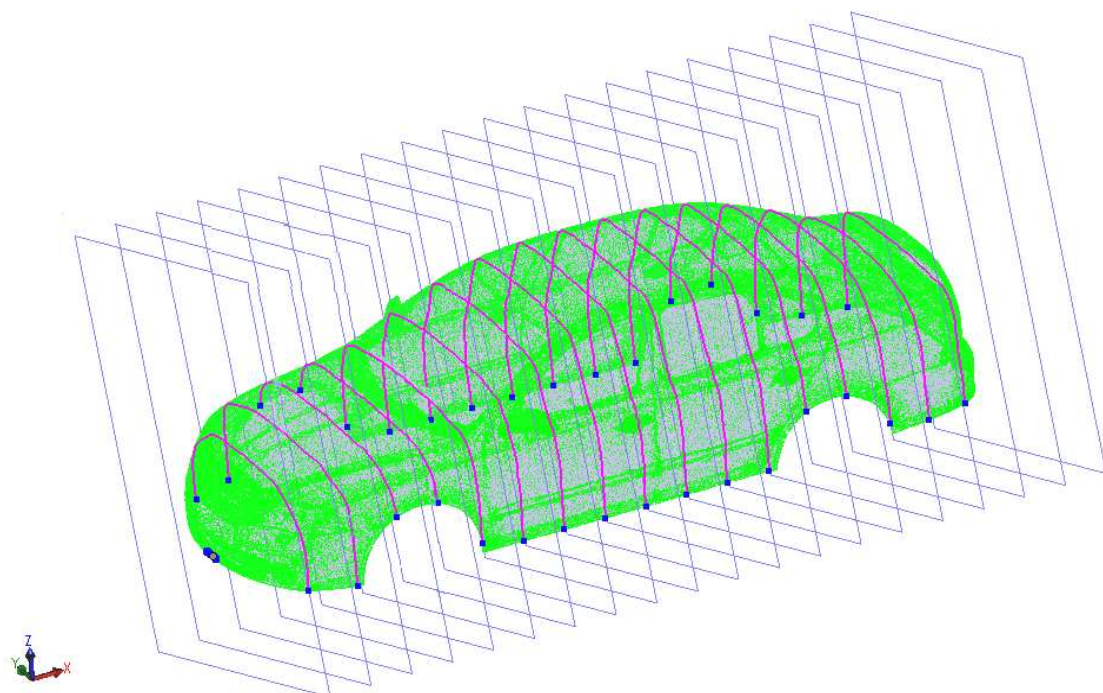
K získání plošného či objemového modelu je možné využít např. funkce tzv. automatické tvorby ploch, kterou obsahuje většina 3D CAD systému. Toto řešení se dá použít pouze v případě jednoduchých součástí, mezi které karoserie automobilu rozhodně nepatří. Model vytvořený funkcí automatické tvorby ploch ukazuje obr. 3.22.

Takto vytvořený model je na první pohled méně kvalitní a došlo u něj k výrazné ztrátě detailů. U složitějších modelů je proto vhodné postupovat jiným způsobem. Na obr. 3.23 je naznačen jeden z možných způsobů. Tím je metoda při níž je model rozřezán po jednotlivých vrstvách, konstantní tloušťky. Vzniklý řez je proložen entitou znázorňující obrys v daném řezu. Takto se postupuje u všech řezů. Všechny tyto řezy se nakonec použitím vhodného nástroje, např. spojením profilů, sjednotí v ucelený povrch. Problémem této metody je však množství řezů, které bychom museli vytvořit, aby nedošlo ke

ztrátě detailů na povrchu. Při uvažovaném měřítku 1:32 a nejmenšímu detailu, který je schopná použitá 3D tiskárna vytvořit, t.j. 0,254 mm, bychom museli vytvořit asi 560 řezů. Z důvodů časové náročnosti bylo od tohoto řešení upuštěno. Na obr. 3.23 je pouze naznačeno možné řešení, kde bylo použito 20 řezů.



Obr. 3.22 Plošný model vytvořený tzv. automatickou tvorbou ploch.



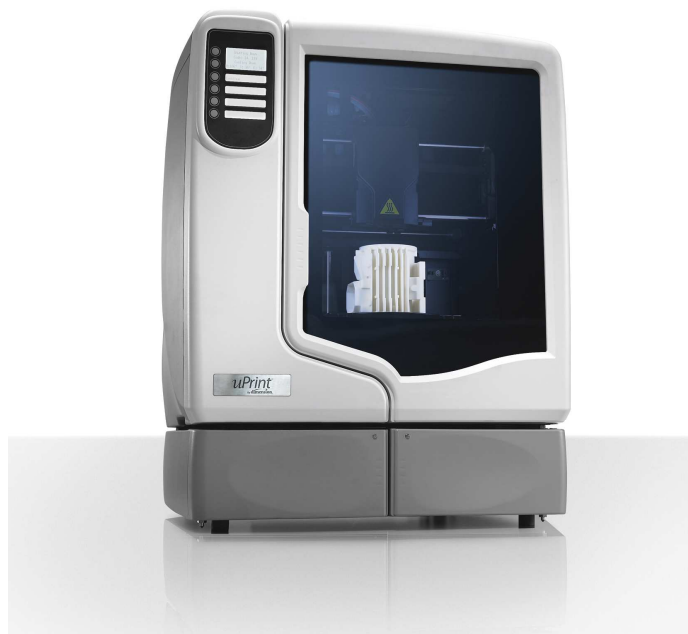
Obr. 3.23 Naznačení tvorby plošného modelu pomocí řezů.

4 VERIFIKACE MODELU METODOU FDM

K verifikaci dat byla použita 3D tiskárna uPrint, která je k dispozici pro studijní účely v komplexním grafickém pracovišti v prostorách FSI VUT.

4.1 Popis 3D tiskárny Dimensions uPrint

Tiskárna Dimension uPrint³² je zařízení pracující na principu FDM (Fused Deposition Modeling, viz. kap. 2.4.6). Z portfolia tiskáren firmy Dimension jde o nejjednodušší řadu, která je oproti modelům z vyšší řady ochuzena o řadu funkcí. Zejména umožňuje používat pouze materiál ABSplusTM v barvě slonoviny. Provedení tiskáren vyšších řad umožňuje používat i různě barevné plasty (barvu lze namíchat i na zakázku). Dále pak používá pouze vlákno o průměru 0,254 mm (0,1 palce) a chybí jí funkce automatického odstraňování podpor. Přes tato omezení tiskárna vyniká nižší pořizovací cenou (11 999 €) a malými prostorovými nároky, což ji předurčuje pro použití v kancelářích. Tiskárna může být vybavena buď jednou cívkou, která slouží jako materiál pro výrobu modelu a současně jako materiál podpor, nebo dvěma cívkami, kdy jedna slouží jako stavební materiál a druhá jako materiál podpor. V našem případě byla použita varianta se 2 cívkami.



Obr. 4.1 3D tiskárna Dimension uPrint³².

Parametry tiskárny Dimension uPrint

rozměry pracovní komory	- 203 x 152 x 152mm
stavební materiál	- ABSplus™ v barvě slonoviny
tloušťka nanesené vrstvy	- 0,256 mm
přesnost	- ±0,256 mm
rozměry zařízení (š x d x v) s 1 cívkou	- 635 x 660 x 800 mm
hmotnost s 1 cívkou	- 76 kg
rozměry zařízení (š x d x v) se 2 cívkami	- 635 x 660 x 953 mm
hmotnost se 2 cívkami	- 94 kg

4.2 Práce s obslužným softwarem CatalystEX

Obslužný software CatalystEX je standardně dodáván ke každé FDM tiskárně vyráběné firmou Stratasys a její dceřiné společnosti Dimension. Slouží k načtení vstupních dat, definování polohy modelu, volbě typu podpor a dalšímu nastavení parametrů tisku. Kvalitu tisku a cenu výsledného výrobku ovlivňují zejména tyto parametry:

Tloušťka vrstvy

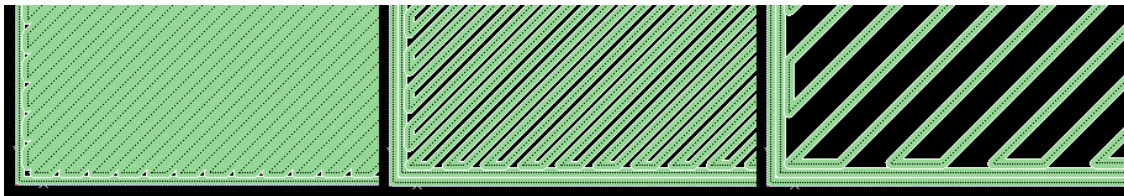
Tiskárna uPrint umožňuje pouze tisk s výškou vrstvy 0,254 mm.

Způsob vyplnění vnitřního objemu modelu

Solid - úplné vyplnění vnitřního objemu modelu. Výsledný výrobek bude pevnější a odolnější, ale na úkor zvýšení spotřeby materiálu a tím pádem i ceny. Varianta solid je vhodná pro výrobu funkčních prototypů a výrobků.

Sparse – high density – vyplnění vnitřního prostoru voštinou. Jedná se o základní nastavení, vhodné spíše pro výrobu maket než funkčních výrobků. Při použití tohoto nastavení dojde k výrazné úspoře materiálu resp. nákladů a zkrátí se doba tisku.

Sparse – low density – podobné nastavení jako „sparse - high density“, ale vnitřní voština nebude tak hustá. Jedná se o neekonomičtější variantu tisku.



Obr.4.2 Způsoby vyplnění vnitřního objemu modelu,
zleva: solid, sparse – low density, sparse – high density³³.

Typ podpor

Minimal – je určen výhradně pro tisk malých součástí a usnadňuje odstranění těchto podpor. Výrobce nedoporučuje používat toto nastavení pro velké nebo vysoké součásti.

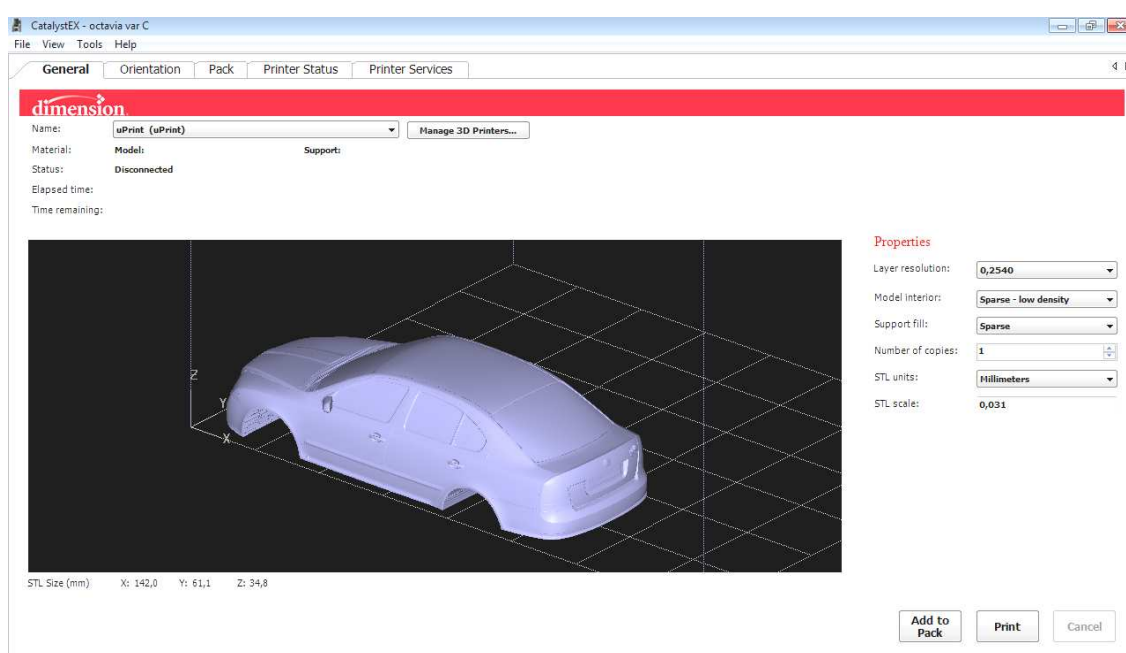
Basic – základní nastavení, které se používá pro většinu součástí. Zachovávají konstantní vzdálenost mezi jednotlivými drahami tiskové hlavy.

Sparse – podobně jako v nastavení výplně i zde nastavení „sparse“ (tzn. řídký) znamená ekonomickou variantu, při níž jsou vzdálenosti mezi drahami nástroje o něco větší než u varianty „basic“, čímž je minimalizována spotřeba materiálu.

Surround – celý model je obklopen materiálem podpor. Toto nastavení je vhodné použít pro vysoké štíhlé výrobky.

Orientace v pracovním prostoru

V záložce „orientation“ je možné využít funkce automatické orientace, nebo si nastavit orientaci ve směrech x, y, z (vždy po 90°) podle vlastního uvážení. Na výslednou kvalitu má totiž velký vliv i směr vrstvení modelu. Zpravidla je vhodné součásti tisknout na výšku i za cenu zvýšené spotřeby materiálu.



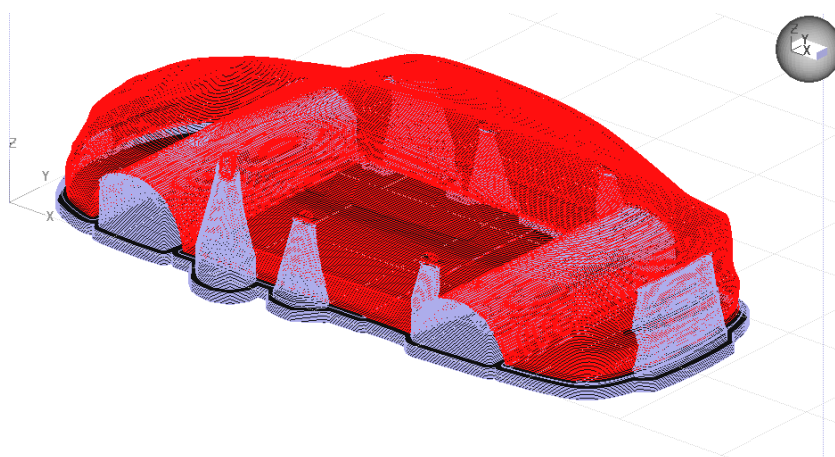
Obr. 4.3 Práce v softwaru CatalystEX 4.0.1.

4.3 Návrh variant řešení

Výhodou softwaru CatalystEX je možnost předem zjistit spotřebu materiálu a teoretickou dobu stavby. V úvahu připadalo několik variant řešení, přičemž vzhledem k požadavku na co nejnižší cenu připadají v úvahu jen řešení, kde je použito nastavení vyplnění vnitřního objemu „Sparse – low density“ a typ podpor také „Sparse“. Otázkou pouze zůstává jaká bude optimální orientace modelu v pracovním prostoru. Pro porovnání jsou však navrženy i některé další varianty. Model je ve všech případech zmenšen do měřítka 1:32 (nastavení měřítka 0,03125, po zaokrouhlení 0,031). Při kalkulaci ceny je uvažováno s náklady 14,40 Kč/cm³ včetně DPH.

Varianta A

Způsob vyplnění vnitřního objemu:	Sparse – low density
Typ podpor:	Sparse
Orientace:	Horizontální



Obr. 4.2 Vrstvy vygenerované v softwaru CatalystEX– varianta A.

Základní materiál [cm ³]	Materiál podpor [cm ³]	Materiál celkem [cm ³]	Teoretická doba stavby [hod]	Výsledná cena [Kč]
68,74	16,38	85,12	3:53	1226

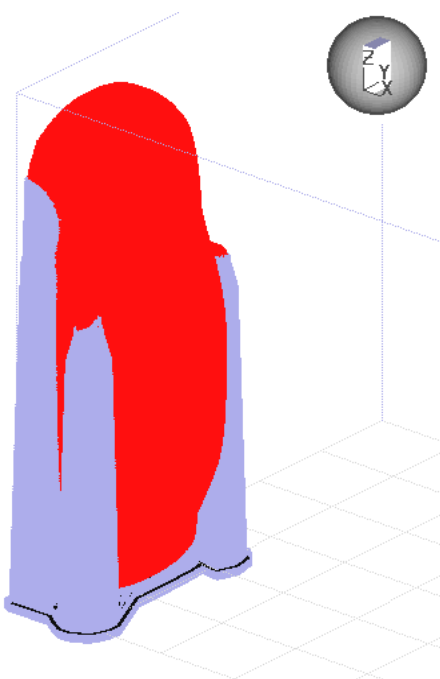
Tab.4.1 Kalkulace – varianta A.

Varianta B

Způsob vyplnění vnitřního objemu: **Sparse – low density**

Typ podpor: **Sparse**

Orientace: **Vertikální**



Obr. 4.3 Vrstvy vygenerované v softwaru Catalyst EX– varianta B.

Základní materiál [cm ³]	Materiál podpor [cm ³]	Materiál celkem [cm ³]	Teoretická doba stavby [hod]	Výsledná cena [Kč]
66,73	27,81	94,54	6:59	1361

Tab.4.2 Kalkulace – varianta B.

Varianta CZpůsob vyplnění vnitřního objemu: **Sparse – high density**Typ podpor: **Sparse**Orientace: **Vertikální**

Základní materiál [cm ³]	Materiál podpor [cm ³]	Materiál celkem [cm ³]	Teoretická doba stavby [hod]	Výsledná cena [Kč]
122,58	26,59	149,17	8:26	2148

Tab.4.3 Kalkulace – varianta C.

Varianta DZpůsob vyplnění vnitřního objemu: **Solid**Typ podpor: **Sparse**Orientace: **Vertikální**

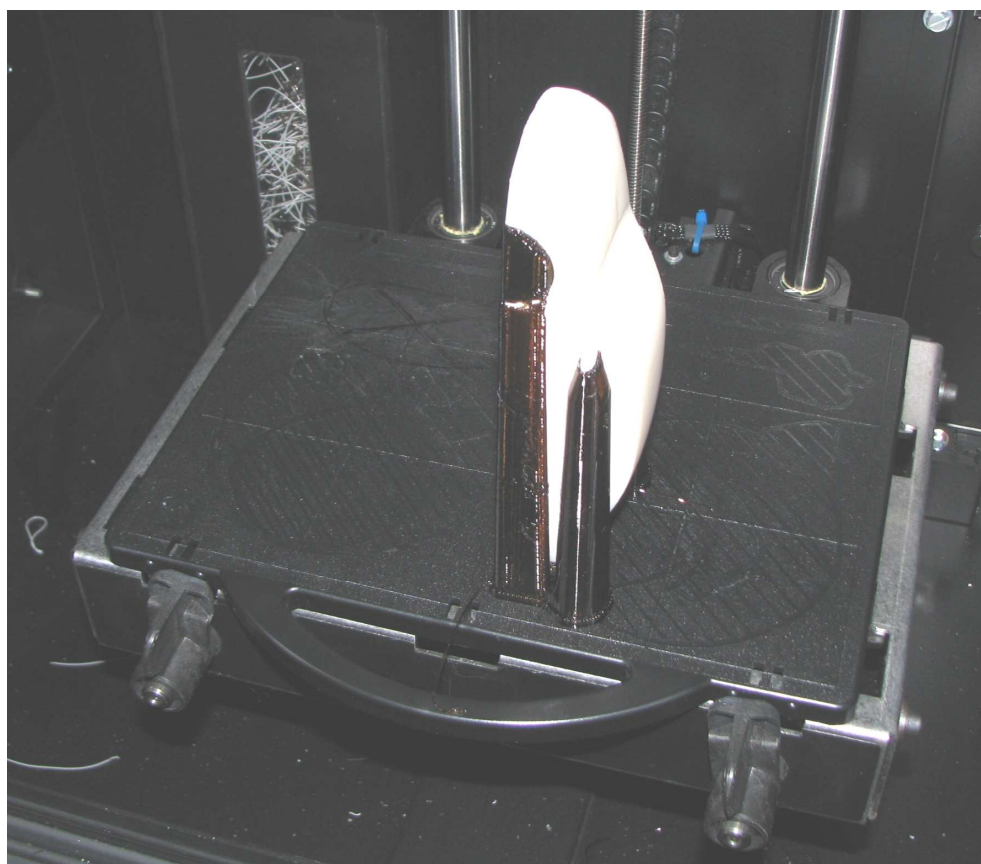
Základní materiál [cm ³]	Materiál podpor [cm ³]	Materiál celkem [cm ³]	Teoretická doba stavby [hod]	Výsledná cena [Kč]
160,50	27,81	188,31	8:27	2712

Tab.4.4 Kalkulace – varianta D.

Z nabízených variant se jako optimální jeví varianta B, přestože je o 135 Kč dražší než varianta A. Modely vyrobené metodou FDM se totiž vyznačují rozdílnou pevností v různých směrech a je proto, pokud je to možné, výhodnější tisknout výrobky raději na výšku. V ose Z mají totiž modely zpravidla nejvyšší pevnost. Mimo zvýšené pevnosti byla u varianty B očekávána i lepší kvalita povrchu.

4.4 Realizace

Po nastavení správných parametrů v softwaru CatalystEX byla tisková úloha odeslána místní LAN sítí do vlastního zařízení uPrint. Tisk byl z důvodů delší doby stavby (cca 7 hodin) realizován přes noc. Druhý den byl po dokončení tisku model vyjmut z pracovního prostoru tiskárny a to včetně podpor a základové desky.



Obr. 4.4 Hotový model včetně podpor v pracovním prostoru 3D tiskárny

Po vyjmutí z tiskárny následovali další operace postprocesingu. Nejprve bylo potřeba model odlomit ze základny. Odstranění podpor je možné provést buď mechanicky nebo rozpuštěním v teplé lázni speciálního roztoku. Rozpouštění podpor se však používá pouze v případě výrobků se složitější geometrií a na hůře přístupných místech. Nevýhodou tohoto způsobu je totiž značná doba rozpouštění podpor. Podpory v našem případě byli poměrně

jednoduše odstranitelné. Pouze bylo potřeba postupovat opatrně u podpor, které byly vytvořeny pod zrcátka tak, aby nedošlo k jejich odlomení.

Další úpravy na modelu již nebyly prováděny. Výsledná kvalita povrchu odpovídá možnostem použité technologie. V přední a zadní části modelu je povrch výrazně horší než na ostatních částech. Pokud bychom provedli realizaci varianty A, která byla o něco výhodnější z hlediska úspory času a materiálu než varianta B, byly by tyto plochy pravděpodobně ještě rozsáhlejší. Lepší kvality povrchu, zejména z estetického hlediska, by bylo možné dosáhnout dalšími operacemi jako např. broušením, obráběním, barvením, lakováním nebo leptáním povrchu ethyl (methyl) ketonem.

Pro kontrolu rozměrů byla měřena pouze délka modelu, neboť na největším rozměru lze kvůli smrštitosti materiálu očekávat největší odchylky. Délka skutečného auta je 4 572 mm, což po přepočtu do měřítka 1:32,258* odpovídá délce 141,7 mm. Pomocí posuvného měřítka byla na vyrobeném modelu naměřena hodnota délky 141,6 mm. Výsledná odchylka 0,1mm je vzhledem k možnostem technologie FDM velmi dobrá a výsledek realizace experimentu tak lze označit za úspěšný.



Obr. 4.5 Výsledek experimentu – zmenšená kopie automobilu

* měřítko 1:32,258 je hodnota zmenšení nejbližší měřítku 1:32, kterou lze v softwaru CatalystEX nastavit, t.j. 0,031 místo přesné hodnoty 0,03125

ZÁVĚR

Použití některé z metod reverzního inženýrství je prakticky jedinou možností jak získat přesný digitální model tak složitého objektu jako je osobní automobil. Protože školní vybavení, v podobě zařízení ATOS Standart staršího data výroby, nesplňovalo naše požadavky, bylo ve spolupráci s firmou MCAE Systems s.r.o. měření provedeno pomocí optického skeneru ATOS II a fotogrametrického systému TRITOP. Měření proběhlo bez větších problémů, přesto by na základě získaných zkušeností bylo možné provést změny, které by měření zpřesnily a urychlily:

- zejména změnit strategii skenování tak, aby došlo k lepšímu provazování skenů,
- snížit počet skenů,
- použít větší měřicí objemy,
- provést skenování v prostorech s lepšími světelnými podmínkami,
- pro omezení vibrací skenovací hlavy nahradit použitý stativ stabilnějším stojanem,
- použití zakrývací pásky se nakonec ukázalo jako zbytečné, neboť vývojku bylo možné snáze odstranit než dříve používané křídové zmatňovadlo,
- stanovení souřadného systému provést pomocí příslušenství k zaměření RPS.

Při vyhodnocování dat se potvrdila nutnost použití kombinace systémů ATOS a TRITOP, protože data získaná samostatným systémem ATOS lze označit za nepřesná. Samotné zpracování dat probíhalo z části za pomoci firmy MCAE, neboť byly zpracovávány velké objemy dat, se kterými by měly běžné počítače problémy. Z celého procesu digitalizace je právě úprava dat a tvorba polygonové sítě časově nejnáročnější. Výstupem digitalizace ze systému ATOS jsou data ve výměnném datovém formátu STL, která jsou po úpravě vhodná přímo k použití na 3D tiskárně uPrint. Pro případy, kdy je

potřeba s modelem dále pracovat je potřeba ho převést na plošného nebo objemového modeláře, protože formát dat STL je pro složitější úpravy nepoužitelný. Toto řešení však bylo v experimentální části pouze naznačeno.

Získaná data byla použita k verifikaci metodou FDM na 3D tiskárně Dimension uPrint, která je umístěna na komplexním grafickém pracovišti v prostorách FSI VUT. Kromě odstranění podpor a drobného začištění povrchu nebyly na vyrobeném modelu prováděny žádné navazující úpravy, protože výsledná podoba modelu zcela splnila naše očekávání. Dosaženou přesnost modelu lze označit za dostatečnou a naznačuje, že jsme se během celého experimentu nedopustili výraznějších chyb.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. VLÁČILOVÁ, H., VILÍMKOVÁ, M., HENCL, L. Základy práce v CAD systému SolidWorks.1. vydání. Brno: Computer Press, a.s., 2006. 319 s. ISBN 80-251-1314-0.
2. JACOBSON, D. M., RENNIE, A. E. W., BOCKING C. E. In Proceedings of the 5th National Conference on Rapid Design, Prototyping, and Manufacture. Professional Engineering Publishing, 2004, pp.112. ISBN 1860584659.
3. PÍŠA, Z., KEJDA, P., GÁLOVÁ, D. Rapid Prototyping in Mechanical Engineering. In Proceedings of the Abstracts 12th International Scientific Conference CO-MA-TECH 2004. Bratislava: STU, 2004. s. 160. ISBN 80-227-2121-2.
4. ZOUHAR, J., PÍŠA, Z., SEDLÁK, J., SEDLÁČEK, J. Produktivní obrábění s využitím metod reverzního inženýrství. In Sborník odborné konference „Frézování IV“. Brno: VUT-FSI, Ústav strojírenské technologie ve spolupráci s PRAMET TOOLS, s.r.o. Šumperk a ZPS – Frézovací nástroje, a.s., Zlín, 31.1.2007. s. 189-196. ISBN 80-214-3239-X.
5. PÍŠA, Z. Komplexní grafické pracoviště. it CAD, 2004, c.3, s. 42-44. ISSN 0862-996X.
6. GOM mbH. Germany: Industrial 3D measuring techniques – for digitizing and deformation measurement. Květen 2005. [online]. [cit. 2010-02-12]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.gom.com>>.
7. NAVRÁTIL, R. Reverse Engineering v praxi. Červen 2000. [online]. [cit. 2010-02-12]. Dostupné na World Wide Web: <<http://robo.hyperlink.cz/re-praxe/index.html>>.
8. NAVRÁTIL R. 3D skenery. Leden 2000. [online]. [cit. 2010-02-16]. Dostupné na World Wide Web: <<http://robo.hyperlink.cz/3dskenery/index.html>>.
9. PÍŠA, Z., PUTZOVÁ, I. Reverse Engineering methods in the machine design. In Low Voltage Electrical Machines 2006. Brno: FEEC BUT, 14.11.2006-15.11.2006. s. 292. ISBN 80-214-3159-8.

10. MCAE Systems s.r.o. Česká republika. FDM TECHNOLOGIE pro rychlou výrobu modelu, prototypu a forem. [online]. [cit. 2010-03-16]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.mcae.cz/iecz.html>>.
11. NAVRÁTIL, R. Rapid Prototyping. Leden 2000. [online]. [cit. 2010-02-20]. Dostupné na World Wide Web: <<http://robo.hyperlink.cz/rapid/index.html>>.
12. Technologie rapid prototypingu. Publikováno v periodice MM Průmyslové spektrum. Únor 2002 .[cit. 2010-03-08].Dostupné na World Wide Web: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/technologie-rapid-prototypingu>>.
13. ŘASA, J., KEREČANINOVÁ, Z. Nekonenční metody obrábění 9. díl. Publikováno v periodice: MM Průmyslové spektrum. Listopad 2008 [online]. [cit. 2010-03-05]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonecni-metody-obrabeni-9-dil>>.
14. SEDLÁK, J., PÍŠA, Z. Rapid prototyping master modelů pomocí CAD/CAM systémů, Prezentováno na mezinárodní konferenci při příležitosti 55. výročí založení fakulty strojní VŠB – Technická Univerzita. Brno: VUT-FSI, Ústav strojírenské technologie. Září 2005. s. 8.
15. ŘASA, J., KEREČANINOVÁ, Z. Nekonenční metody obrábění 10. díl. Publikováno v periodice MM Průmyslové spektrum. Prosinec 2008 [online]. [cit. 2010-03-05]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonecni-metody-obrabeni-10-dil>>.
16. Additive Fabrication. CustomPartNet. Leden 2008. [online]. [cit. 2010-03-07]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.custompartnet.com/wu/additive-fabrication>>.
17. Direct Metal Laser Sintering. [online]. [cit. 2010-03-10]. Dostupné na World Wide Web: <www.dmls.cz>.
18. NAVRÁTIL, R. Reverse Engineering – Trocha teorie. Leden 2000. [online]. [cit. 2010-04-20]. Dostupné na World Wide Web: <<http://robo.hyperlink.cz/re-teorie/index.html>>.
19. ŠIMONÍK, M. Digitalizace – její princip a rozdělení. Publikováno v periodice MM Průmyslové spektrum. Červen 2004 [online]. [cit. 2010-03-10]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/>>

- digitalizace-jeji-princip-a-rozdeleni>.
20. Uživatelská příručka ATOS II/II SO Hardware. 2. vydání. 2008-03-01.
 21. Uživatelská příručka ATOS v 5.2.0. 1. vydání. 2003-11-11.
 22. FOŘT, P. Jak se rodí automobil. Publikováno na portále DesignTech. 21.5.2008. [online]. [cit. 2010-04-10]. Dostupné na World Wide Web:<<http://www.designtech.cz/c/plm/jak-se-rodí-automobil.htm>>.
 23. SYŘIŠTĚ, D., SKOPEČEK, T., KAPINUS, V. Reverzní inženýrství, digitalizace a výroba forem. Publikováno v periodice MM Průmyslové spektrum. Prosinec 2004 [online]. [cit. 2010-03-05]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/reverzni-inzenyrstvi-digitalizace-a-vyroba-forem>>.
 24. FIŠEROVÁ, V. Solidworks jako nástroj pro reverzní inženýrství. Publikováno na portále CAD.cz. [cit. 2010-05-09]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.cad.cz/component/content/article/1492.html>>
 25. Žaloudková, M. Antropologický výzkum. Leden 2009. [online]. [cit. 2010-04-30]. Dostupné na World Wide Web: <<http://westerndesert.geolab.cz/cz/antrop.htm>>.
 26. Katalog souřadnicový měřících strojů Mitutoyo. [online]. [cit. 2010-01-19]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.mitutoyo-czech.cz/cz/sms.asp>>.
 27. SLÁMA, J. Zlepšete produktivitu s novou generací měřících sond. Publikováno v periodice MM Průmyslové spektrum. Červenec 2007 [online]. [cit. 2010-03-05]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/zlepsete-produktivitu-s-novou-generaci-mericich-sond>>.
 28. Technická dokumentace k optickým systémům firmy GOM mbH. [online]. [cit. 2010-03-05]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.gom-france.com/home/telechargements/documentation_technique.htm>.
 29. PÍŠKA, M., a kolektiv. Speciální technologie obrábění. 1. vydání. Brno: CERM s.r.o., 2009. 33 s. ISBN 978-80-214-4025-8.
 30. Specifikace systému Minolta VIVID 9i. [online]. [cit. 2010-04-21]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.konicaminolta.com/instruments/products/3d/non-contact/vivid9i/specifications.html>>.

31. Specifikace systému Handyscan 3D. [online]. [cit. 2010-04-21]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.handyscan.cz/>>.
32. Specifikace 3D tiskárny Dimension uPrint.. [online]. [cit. 2010-04-30]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.dimensionprinting.com/3d-printers/printing-productspecs-uprint.aspx>>.
33. CatalystEX 4.0.1[®]. [online]. ©1991-2009 Stratasys Inc. Eden Prairie, Mn. Všechna práva vyhrazena, 2009 [cit. 2010-04-30]. Dostupné na World Wide Web <<http://www.dimensionprinting.com/3d-printers/printing-productspecs-uprint.aspx>>.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
3D	-	3 Dimensional – trojrozměrné
3DP	-	3 Dimensional Printing – označení technologie RP
ABS	-	Akrylonitrilbutadienstyren – označení plastu používaného v 3D tiskárnách FDM
ATOS	-	Advanced Topometric Sensor – označení optického skeneru firmy GOM
BPM	-	Ballistic Particle Manufacturing – označení technologie RP
CAD	-	Computer Aided Design - počítačem podporované navrhování - software pro projektování či konstruování na počítači
CAI	-	Computer Aided Inspection – počítačem podporovaná kontrola
CAM	-	Computer Aided Manufacturing - počítačem podporovaná výroba – software pro řízení či automatizaci výroby
CAQ	-	Computer Aided Quality – počítačem podporovaná kontrola kvality
CCD	-	Charge Coupled Devices - integrovaný obvod (čip) obsahují světlocitlivé elementy
CMM	-	Coordinate Measuring Machine – souřadnicový měřicí stroj
CNC	-	Computer Numerical Control – označení číslicově řízeného obráběcího stroje
d	[mm]	délka
DESCAF	-	Design Controled Automated Fabrication – označení technologie RP

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
DLF	-	Direct Laser Forming - označení technologie RP
DMLS	-	Direct Metal Laser Sintering - označení technologie RP
DSPC	-	Direct Shellt Production Casting - označení technologie RP
FDM	-	Fused Deposition Modeling - označení technologie RP
FEM	-	Finite Element Method – viz. MKP
LAN	-	Local Area Network – místní počítačová síť
LOM	-	Laminated Object Manufacturing – označení technologie RP
MJM	-	Multi Jet Modeling - označení technologie RP
MJS	-	Multiphase Jet Solidification – označení technologie RP
MKP	-	Metoda konečných prvků – numerická metoda sloužící k simulaci průběhů napětí, deformací
NC	-	Numerical Control – všeobecné označení číslicově řízeného stroje
PC	-	Personal Computer – osobní počítač
PCT	-	Printed Computer Tomography – označení technologie RP
RE	-	Reverse Engineering – reverzní (zpětné) inženýrství
RP	-	Rapid Prototyping – rychlá výroba prototypů
RPS	-	Reference Point System – soustava bodů na karoserii, která slouží k ustavení během výroby a kontroly

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
SCS	-	Solid Creation System - označení technologie RP
SGC	-	Solid Ground Curing - označení technologie RP
SLA	-	Stereolitography – stereolitografie - označení technologie RP
SLS	-	Selective Laser Sintering - označení technologie RP
STL	-	označení výměnného datového formátu
SOUP	-	Solid Object Ultraviolet Laser Plotting - označení technologie RP
š	[mm]	šířka
UV	-	Ultra Violet – ultra fialová
v	[mm]	výška