



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

Digitalizace trupu ultralehkého letounu pro technologii výroby přesných forem

Digitalization of ultralight aircraft fuselage for precise mould production
technology

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

BC. FILIP VÉLE

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

ING. JAN ZOUHAR

BRNO 2009

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2008/2009

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Filip Véle

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:

Digitalizace trupu ultralehkého letounu pro technologii výroby přesných forem

v anglickém jazyce:

Digitalization of ultra-light plane fuselage for production of accurate mould

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Konstrukce ultralehkých letadel prošla v minulých letech značným vývojem. Do popředí se dostává počítačové navrhování letounů a forem pro výroby laminovaných skořepinových dílů. Tyto formy jsou do dnešních dnů ručně vyráběny a upravovány. Cílem práce je digitalizace hotového výrobku s úpravami a zpracování těchto dat pro možnost výroby nové formy.

Cíle diplomové práce:

Cíle a body práce:

- literární rešerže pro technologii výroby trupu ultralehkých letadel,
- principy rozdělení a funkce optických skenerů,
- popis práce systému TRITOP a ATOS,
- digitalizace trupu letounu,
- zpracování naměřených dat,
- návrh postupu výroby nové formy.

Seznam odborné literatury:

GOM mbH. Germany: Industrial 3D measuring techniques – for digitizing and deformation measurement [online]. Květen 2005. Dostupné na World Wide Web:< <http://www.gom.com>>.

SALOMON, D. Computer Graphics & Geometric Modeling, 1. vyd. Springer: California State University, 1999. 871 str. ISBN 0-387-98682-0.

ŽÁRA, J. BENEŠ, B. SOCHOR, J. FELKEL, P. Moderní počítačová grafika, 2. vyd. Praha: Computer Press, 2005. 628 str. ISBN 80-251-0454-0.

ATOS,TRITOP – User manual. GOM mbH. Braunschweig. Germany. 2007.

ZOUHAR, J., PÍŠA, Z., SEDLÁK, J., SEDLÁČEK, J. Produktivní obrábění s využitím metod reverzního inženýrství. Frézování IV. FSI, VUT v Brně, 2007. pp.189-196. ISBN 80-214-3239-X.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Jan Zouhar

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2008/2009.

V Brně, dne 20.11.2008

L.S.

doc. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Digitalizace trupu ultralehkého letounu pro technologii výroby přesných forem** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

28. 05. 2009

.....

Podpis

Poděkování

Děkuji tímto Janu Zouharovi za příkladné vedení a odbornou pomoc při tvorbě této diplomové práce. Děkuji Ambrózi Bothovi za nezištnou odbornou asistenci při skenování. Děkuji vedení a zaměstnancům firmy MCAE SYSTEMS s.r.o. a UL-JIH s.r.o. za to, že mi umožnili realizovat záměr této práce.

ANOTACE

Bc. Filip Véle

Digitalizace trupu ultralehkého letounu pro technologii výroby přesných forem
DP, ÚST, 2009, str. 57, obr. 35, přílohy 3

Práce se zabývá digitalizací trupu a tvorbou 3D modelu ultralehkého letounu s ohledem na budoucí využití dat pro konstrukci přesných forem trupu pro ruční vakuové laminování. Na základě rešerše je stanoven vhodný prostředek realizace a stanoveny postupy vedoucí k digitalizaci, včetně popisu zařízení a software použitých pro proces digitalizace.

Cílem práce je aplikace dostupných metod digitalizace při tvorbě 3D modelu letounu a návrh výroby přesných forem.

Klíčová slova

Reverzní inženýrství, digitalizace, ultralehká letadla,

SUMMARY

BSc. Filip Véle

Digitalization of ultralight aircraft fuselage for precise mould production technology

DW, IMT, 2009, pp. 57, fig. 35, appendices 3

This work describes digitalization and creation of ultralight aircraft 3D model in order to create accurate moulds for fuselage lamination. Right choice of technology is based on background research. Designed procedures are described in detail as well as used equipment, hardware and software.

Objective of this project is application of available methods of digitalization to create 3D aircraft model and its usage for accurate mould design.

Keywords

Reverse engineering, digitizing, ultralight aircraft,

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

3D	3 dimensional
CA (X)	Computer aided ...
CAD	Computer aided design
CAM	Computer aided manufacturing
CCD	Charge coupled device
CIM	Computer integrated manufacturing
CMOS	Complementary metal oxide semiconductor
CT	Computed tomography
LED	Liht emitting diode
LSA	Light sport aircraft
NACA	National advisory committee for aeronautics
PC	Personal computer
SAT	Střední aerodynamická těliva
STL	Stereolitografie
TOF	Time of flight
UD	Undirectional
UL	Ultralehké

SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK

Obr. 1: Letadla z produkce firmy UL-JIH s.r.o. (1)	11
Obr. 2: F-100 C Fascination.....	13
Obr. 3: Schéma základních rozměrů a částí letounu F100	14
Obr. 4: Schéma laminování do vakuových forem	14
Obr. 5: Lepení Airexových desek do formy trupu	15
Obr. 6: 1D a 2D aktivní triangulace (4).....	17
Obr. 7: Deformace světelných pruhů při dopadu na povrch.....	18
Obr. 8: Pasivní triangulace pomocí 2 kamer	19
Obr. 9: Schéma interferometru (4)	20
Obr. 10: Real-time TOF kamera firmy MESA (8)	21
Obr. 11: Interferometrie: a) typické uspořádání, b) rozdílový interferogram (4)	21
Obr. 12: Topologie zad s využitím metody projekce moiré proužků (9)	22
Obr. 13: 3D digitizér řady Baces3D firmy FriulROBOT S.r.l. (11)	23
Obr. 14: Portálový souřadnicový měřicí stroj firmy Mitutoyo (12)	23
Obr. 15: Stanice systému ATOS III a TRITOP v terénu	27
Obr. 16: Barevná mapa porovnání odchylek skenování s a bez systému TRITOP	28
Obr. 17: Trup letounu ve vhodném přípravku pro snadnější manipulaci.....	30
Obr. 18: Letoun připravený pro focení TRITOPem	31
Obr. 19: Metodika focení systémem TRITOP	32
Obr. 20: Reálné provedení.....	32
Obr. 21: Zaměřené body v systému TRITOP	33
Obr. 22: Body naměřené TRITOPem načtené v ATOSu	35
Obr. 23: ATOS III při práci ve stojanu	36
Obr. 24: Prostředí systému ATOS při skenování	36
Obr. 25: Výsledek skenování	37
Obr. 26: Výsledek úpravy dat.....	38
Obr. 27: Těžiště křídla a letounu	40
Obr. 28: Ustavení letounu v souřadném systému	41
Obr. 29: Model letounu, pomocné a konstrukční roviny a ustavený souřadnicový systém ..	42
Obr. 30: Barevná mapa odchylek rovinnosti dělicí roviny formy	43
Obr. 31: Barevná mapa porovnání změn tvaru trupu po vyjmutí z formy.....	44
Obr. 32: Barevná mapa porovnání pravolevé symetričnosti trupu – pohled -Y.....	46
Obr. 33: Barevná mapa porovnání pravolevé symetričnosti trupu - pohled –Z	46
Obr. 34: Barevná mapa porovnání CAD modelu VS a reálné součásti	48

Obr. 35: Síť řezů STL dat.....	49
Obr. 36: Hotový 3D model letounu.....	50
Tabulka 1: Doba skenování.....	41

OBSAH

Seznam použitých symbolů a zkratk.....	6
Seznam obrázků a tabulek	7
Obsah	9
1 Úvod	11
2 Teoretická část	13
2.1 Ultralehká letadla.....	13
2.1.1 Technologie výroby trupu	14
2.1.2 Formy pro laminování.....	16
2.1.3 Problémy plynoucí z technologie.....	16
2.2 Průmyslové scannery	17
2.3 STL formát dat.....	23
3 Definice problému a cíle práce	24
4 Idea Realizace	25
4.1 Volba vhodného prostředku digitalizace	26
5 Realizace	27
5.1 Porovnání přesnosti TRITOP - ATOS.....	27
5.2 Skenování letounu.....	29
5.3 Data systému TRITOP	29
5.3.1 Vlastnosti systému	30
5.3.2 Příprava skenování	30
5.3.3 Příprava skenovaného objektu.....	31
5.3.4 Vlastní skenování	32
5.3.5 Zpracování	33
5.4 Data systému ATOS.....	34
5.4.1 Vlastnosti systému	34
5.4.2 Barevná mapa.....	34
5.4.3 Příprava skenování	35
5.4.4 Vlastní skenování	36
5.4.5 Zpracování	37
6 Vyhodnocení.....	40
6.1 Ustavení letounu v souřadném systému.....	40

6.1.1 Ideální těžiště letounu	40
6.1.2 Praktické ustavení	42
6.2 Kontrola tvarů trupu a formy	43
6.2.1 Odchytky rovinnosti dělicí roviny formy	43
6.2.2 Porovnání poloviny trupu vyjmutého z formy a formy	44
6.2.3 Porovnání symetrie pravé a levé části trupu	46
6.2.4 Porovnání výškového stabilizátoru s CAD modelem	48
6.3 Návrh postupu tvorby modelu letadla a formy	49
6.4 Výroba formy	51
6.4.1 Požadavky kladené na formu pro ruční vakuové laminování:	51
6.4.2 Navrhovaná řešení:	51
7 Ekonomické hodnocení	54
8 Závěr	55
9 Citovaná literatura.....	56
Seznam příloh.....	57

1 ÚVOD

UL-JIH s.r.o. je firma, která se dlouhodobě zabývá vývojem a výrobou ultralehkých letounů a letounů kategorie LSA (light sport aircraft). V současné nabídce firmy jsou 3 typy letounů v různých výrobních variantách:



Obr. 1: Letadla z produkce firmy UL-JIH s.r.o. (1)

- Sunwheel, dvouplošník klasické koncepce s příhradovým rámem,
- E - 100 Evolution, hornoplošník kompozitní sendvičové konstrukce a
- F - 100 Fascination, dolnoplošník kompozitové sendvičové konstrukce se zatahovacím podvozkem.

Nabídka odráží současný stav trhu, který vyžaduje technicky dokonalé stroje, s dobrými letovými vlastnostmi a vysokým uživatelským komfortem. Typ F- 100C Fascination v současnosti tvoří zhruba 75% produkce firmy UL-JIH. Firma vyrobila více než 200 ks těchto letadel a setkat se s nimi lze v mnoha státech napříč kontinenty.

Všechny letouny z provenience UL-JIH byly navrženy a konstruovány klasickými postupy, které jsou dnes již zastaralé. Dle provedených studií byly vytvořeny polystyrenové modely, jednotlivé části o laminovány a posléze ručně

upraveny do podoby forem. Konstrukteři se dopustili celé řady nepřesností, které negativně ovlivňují výsledný výrobek.

Chce-li firma udržet krok s konkurencí, musí být její výrobky kvalitnější a levnější. Vývoj vysoce kvalitních produktů rychle a levně již není strategickým cílem podniků, je to základním principem pro úspěšné průmyslové společnosti v globální ekonomice. Změny ve způsobech výroby a vznik nových technologií jsou pak jen odrazem těchto potřeb. Dnešní výrobu si již nelze představit bez kvalitních a výkonných počítačů. V samotné výrobě se prosazuje takzvané souběžné inženýrství, tedy způsob konstrukce, kdy všechny složky výroby (konstrukteři, designéři, technologové atd.) spolupracují již od fáze návrhu. Ti při své práci využívají složité 3D CA (X) software (CIM), které ulehčují současnou práci mnoha odborníků v reálném čase, návrh, úpravy modelu, přípravu výroby a následnou výrobu. (2)

Bylo by chybou domnívat se, že nasazení 3D systémů je důležité pouze v oblasti vývoje a výroby. Využívání 3D technologií ve vývoji a výrobě vyvolává poptávku po mechanismech, které by efektivně převedly do 3D modelů starší výrobky, 2D dokumentaci a další neprostorové prvky.

Tato práce se zabývá digitalizací trupu letounu F – 100 fascination a prezentuje možnosti využití získaných dat na sérii měření a návrhu výroby nové formy.

2 TEORETICKÁ ČÁST

2.1 Ultralehká letadla

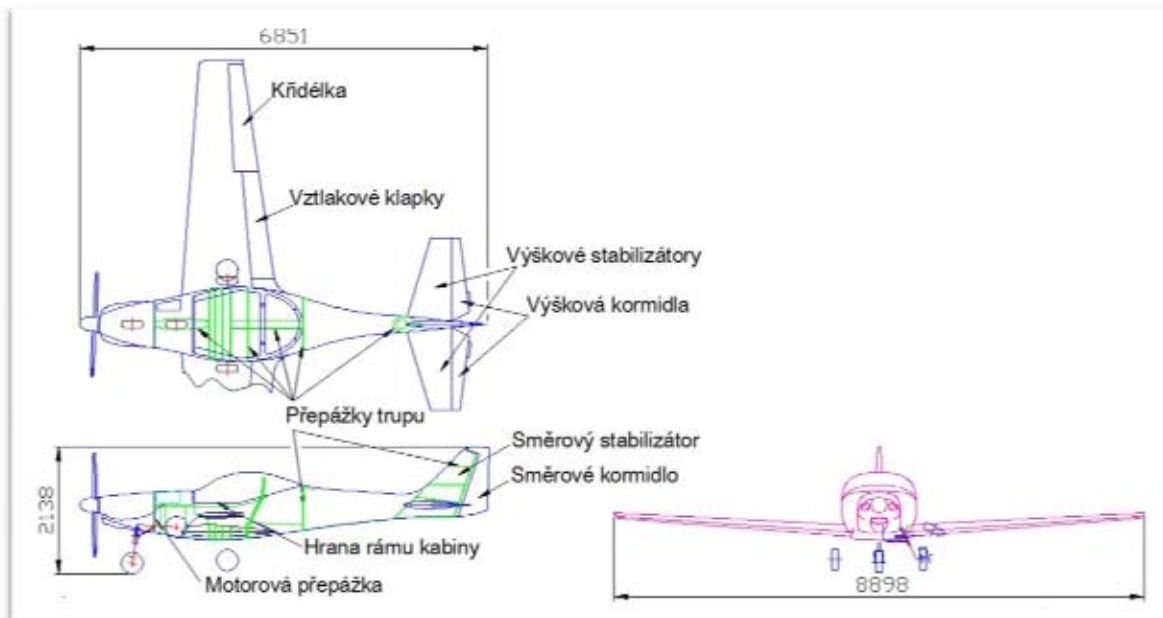
Kategorie ultralehkých letadel vznikla na konci sedmdesátých let minulého století. Ultralehké letadlo je dle české legislativy letadlo s maximální vzletovou hmotností 450kg s možností létat pouze za podmínek přímé viditelnosti a je třeba zmínit, že zákony týkající se provozu těchto letadel se liší zemi od země. Provoz ultralehkého letadla není v dnešní době spojen s žádným větším technickým, či legislativním problémem, což dokazuje i to, že počet UL letadel dosahuje v české republice 20% všech civilních letadel. (3)



Obr. 2: F-100 C Fascination

Kromě čistě zájmové oblasti se začínají ultralehká letadla prosazovat i v dalších odvětvích lidského počínání, jako především v dopravě osob či zboží. To je umožněno stále se zdokonalujícími konstrukcemi letadel a v neposlední řadě zvyšováním výkonů. Hranice mezi kategoriemi letadel se značně rozostřují. Ve sjednocené Evropě není žádným problémem překračování hranic států a možnost UL letadel přistávat na neoficiálních letištích z nich činí žádané dopravní prostředky. Spolu s doletem hodně přes 1000km a náklady na provoz letadla (cca

70% nákladů na provoz osobního automobilu) lze očekávat vytrvale stoupající zájem o ultralehká letadla.



Obr. 3: Schéma základních rozměrů a částí letounu F100

2.1.1 Technologie výroby trupu

Na konstrukci všech kompozitových součástí se používá otevřených forem, ve kterých jsou laminovány jednotlivé vrstvy trupu či křídel. Potřebnou kvalitu součástí pomáhá udržet technologie vakuování. Principem je překrytí laminované vrstvy neprodyšným materiálem, např. igelitem, utěsnění a odsávání vzduchu. Spolu se vzduchem odchází i přebytečný epoxid. Zároveň, nebo posléze je součást temperována v termoboxu na teplotu 60-80° Celsia přičemž dochází k vytvrzení a zpevnění epoxidu.



Obr. 4: Schéma laminování do vakuových forem

Trup se sestavuje z pravé a levé poloviny, každé křídlo z horní a spodní poloviny. Po dokončení laminování všech vrstev ve formě jsou vlepeny další prvky, jako např. vyztužující žebra a jednotlivé části trupu nebo křídel jsou sestaveny dohromady, stále ve formách. Formy se spojí mechanicky, např. šrouby a jednotlivé poloviny jsou slepeny či zevnitř prolaminovány. Vzájemná poloha částí forem je ustavena čepy.

Pro laminování se používá celá řada materiálů o rozdílné hustotě, potažmo pevnosti. Především se jedná o sklolaminát, uhlíkové látky, kevlarové látky a uhlíkové jednosměrné výztuhy UD. Jako pojivo je používán epoxid, či rychleschnoucí epoxid. Pro lepení některých součástí se využívá epoxidu s drcenou bavlnou jako plnivem. Potřebnou mechanickou odolnost sendvičové výplně dodává materiál Airex. Jedná se o velmi pevnou PU pěnu dodávanou ve formě desek o hmotnosti $60\text{--}130\text{ kg/m}^3$ a tloušťce $5\text{--}20\text{ mm}$. Pěna je do jisté míry tvarovatelná a tvoří jádro sendviče. Protože je povrch desky nestejnorodý, natírá se před lepením mezi vrstvy látek epoxidem se speciální, velmi lehkou látkou jako plnivem. To zaručí hladký povrch Airexové desky a posléze dokonalé přilnutí epoxidu a dostatečnou pevnost celé součásti (viz Obr. 5). Metodika skladby vrstev je jednoznačně určena dokumentací a má pochopitelně největší vliv na celkovou pevnost konstrukce. Jako výztuh základního sendviče se užívá jednosměrných pásnic tvořených vlákny uhlíku, případně bloky ze silného skleněného laminátu.



Obr. 5: Lepení Airexových desek do formy trupu

2.1.2 Formy pro laminování

Formy pro výrobu většiny komponent letounu byly vyrobeny na základě polystyrenového modelu letounu metodou laminování. Materiálem jsou skleněná vlákna. Tloušťka stěny formy je maximálně několik centimetrů kvůli váze. Skořepina formy je upevněna ve svařované železné konstrukci pro zvýšení pevnosti. Forma je ze své funkční strany leštěna. Po obvodu dělicí roviny a v mnoha bodech uvnitř formy jsou vyvrtány otvory pro odsávání vzduchu.

Laminátové formy mají mnoho pozitivních vlastností. Jsou dostatečně lehké pro ruční manipulaci, jsou pevnostně a teplotně stálé a snadno se opravují. Za negativní vlastnost lze považovat náchylnost k poškození, především povrchovým, které snižují kvalitu laminovaného produktu či jeho povrchovou úpravu.

2.1.3 Problémy plynoucí z technologie

Protože se jedná o ruční práci, vzniká při výrobě řada nepřesností neúměrně navyšujících především čas výroby, potažmo finanční nákladnost výroby. Mezi nejpalčivější problémy patří:

- Nepřesné formy vyžadují ruční úpravu většiny prvků vlepovaných do trupu či křídel – přepážky, výztuhy.
- Náhradní díly nejsou zaměnitelné a náhradní díly je třeba dodatečně ručně upravovat.
- Nekvalitní formy způsobují potřebu náročné a drahé povrchové úpravy celého letounu.
- Nepřesné tvary v řadě případů znemožňují využití přípravků např. pro přesné ustavení přepážek trupu. Následně není dodržena rozměrová přesnost, která komplikuje montáž a vyžaduje dodatečné úpravy.
- Nepřesné definování tvarů trupu brzdí technologický vývoj a optimalizaci výroby. V řadě případů nelze využít např. řezání dílů vodním paprskem či laserem, nebo je třeba tyto díly ručně pasovat.

[Opravit odrážky](#)

2.2 Průmyslové scannery

Průmyslové scannery nachází uplatnění v celé řadě oborů. Jedná se především o tyto oblasti:

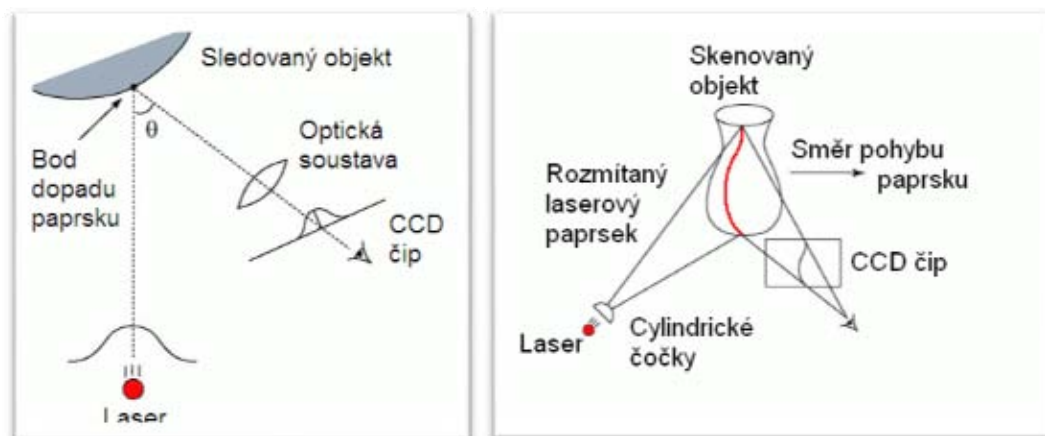
- Design,
- softwarová analýza,
- renovace,
- modifikace,
- rychlá kontrola,
- výroba prototypů.

Další možnou oblastí využití 3D technologie je metrologie a zkušebnictví. Oba tyto obory se do jisté míry prolínají. Digitalizování hotové součásti umožňuje velmi efektivní měření rozličných prostorových či strukturálních prvků a často se jedná o jedinou možnou metodu kontroly jiným způsobem neměřitelných rozměrů.

Abychom objasnili specifické vlastnosti různých typů scannerů, je třeba ukázat princip funkce základních a nejpoužívanějších typů. Existuje několik rozdílných fyzikálních principů použitelných pro optická měření a získávání informací o povrchu. Jedná se o metody:

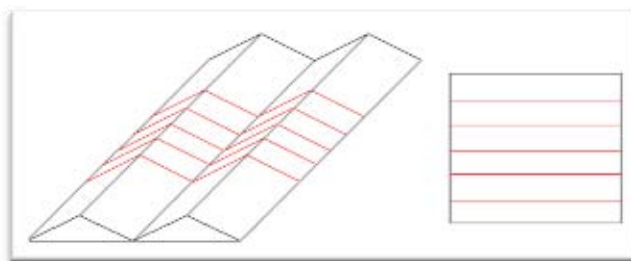
a) Triangulace

- Triangulace aktivní



Obr. 6: 1D a 2D aktivní triangulace (4)

Technika aktivní triangulace spočívá ve fotogrammetrické rekonstrukci snímaného objektu nasvícením jeho povrchu aktivním světelným zdrojem (například laserem či LED diodou) a současným snímáním povrchu objektu CCD nebo CMOS snímačem. Výsledkem snímání je rastrový obraz. Zdroj světla spolu se snímačem a osvětleným bodem na zkoumaném objektu tvoří takzvaný triangulační trojúhelník. Spojnici mezi světelným zdrojem a snímačem pak nazýváme triangulační bází. Na straně světelného zdroje je úhel svíraný triangulační bází konstantní, kdežto na straně snímače je úhel určen proměnnou pozicí osvětleného bodu na CCD snímači. Z velikosti tohoto úhlu lze na základě znalosti triangulační báze určit souřadnici bodu na povrchu objektu.



Obr. 7: Deformace světelných pruhů při dopadu na povrch

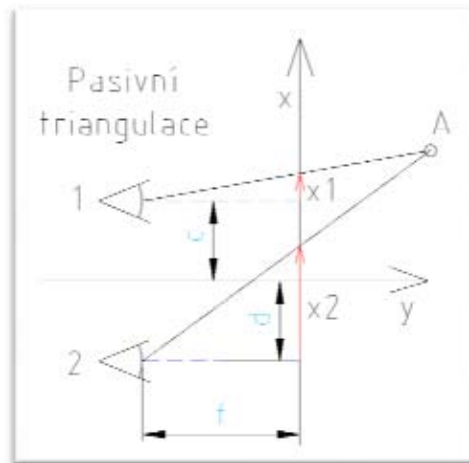
K označení povrchu se používají různé světelné vzory: světelný paprsek (jednorozměrná triangulace), světelný pruh (dvourozměrná triangulace) nebo strukturovaný světelný svazek (trojrozměrná triangulace). Použijeme-li celý strukturovaný světelný svazek, je objekt změřen najednou, což je rychlejší než v případě jednorozměrných a dvourozměrných triangulací, kdy je nutné scénu měřit postupně. Postupné měření je nevhodné také v případě pohybujících se objektů. (4)

- Triangulace pasivní (5)

Pasivní triangulační techniky zahrnují v podstatě různé formy digitální fotogrammetrie. "Pasivní" znamená, že není uvažováno geometrické uspořádání osvětlení. Používají se tyto základní metody:

- Více kamer se známou orientací,
- více kamer s automatickou kalibrací,
- jedna kamera v různých polohách s automatickou kalibrací.

U dynamických systémů se často aplikuje více kamer a využívá se znalosti relativních poloh nebo metod automatické kalibrace. Pro statické scény se používá jedna kamera, která získá snímky ze dvou a více různých pohledů. Na Obr. 8 je schéma principu. Kamery 1 a 2 s rovnoběžnými osami a stejnou ohniskovou vzdáleností snímají bod v prostoru A . Na základě matematického výpočtu a zjištěných vzdáleností x_1 a x_2 lze stanovit souřadnice bodu A v prostoru.



Obr. 8: Pasivní triangulace pomocí 2 kamer

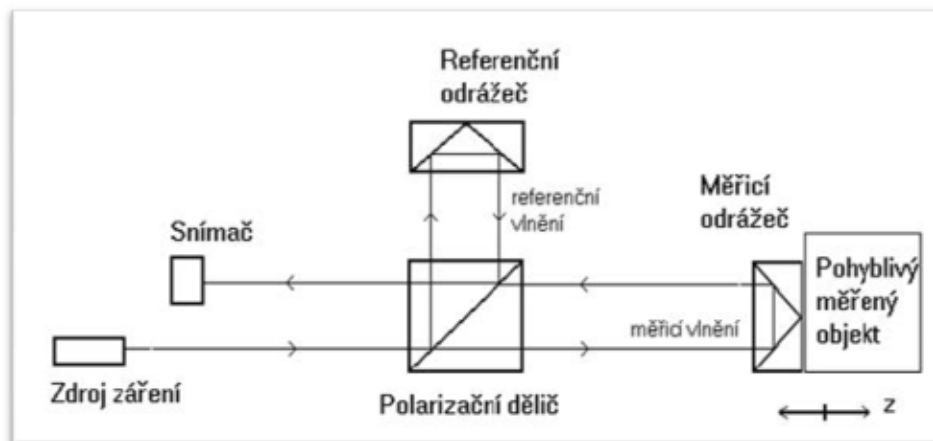
Metod triangulace využívají především scannery optické. Tyto scannery dovolují velmi rychle digitalizovat i velmi složité tvary s velkou přesností, nedovolují však z principu funkce získávat data o hlubších prohlubních či otvorech. Pro digitalizování složitějších tvarů, je třeba vytvářet snímky z více směrů a návaznost jednotlivých snímků je zajištěna náhodně rozmístěnými referenčními body. Pro dosažení nejvyšší možné přesnosti je třeba, aby byl povrch jednobarevný, neodrážel světlo a vlastní digitalizování proběhlo ve vhodných světelných podmínkách.

Na principech triangulace jsou konstruovány též scannery tzv. laserové. Již z názvu vyplývá, že projekčním prvkem je zde laser. Vyhodnocována je doba, a směr návratu odraženého paprsku. Kvalita je dána především vzorkovací frekvencí. Mezi nejvýznamnější výrobce scannerů optických patří firmy GOM či 3D Metrics mezi laserovými se prosadila firma Creaform 3D se scannerem Handyscan.

Společným jmenovatelem optických scannerů je pak pojem Cloud of points, (mrak bodů) vyjadřující typ naskenovaných dat. Pro další grafickou či CAD reprezentaci je třeba mrak bodů vyhlazovat, upravovat, případně do jisté míry idealizovat. (6), (7)

b) Optická interferometrie

Jedná se o metody, jejichž princip je založen na měření doby letu koherentního záření. Jak ukazuje Obr. 9, je vlnění rozděleno na měřicí (signálové, předmětové) a referenční. (4)



Obr. 9: Schéma interferometru (4)

Spojí-li se vlna rozptýlená od předmětu s referenční vlnou, mohou spolu interferovat. Vznikne tak vlnění, jehož celková intenzita je dána tzv. interferenční rovnicí. Tímto způsobem je možné zaznamenat informaci nejen o amplitudě vlny, ale i o její fázi resp. fázovém rozdílu. Protože je měřen fázový rozdíl, neumožňuje metoda měřit absolutní vzdálenost zkoumaných bodů. Jednoznačné určení vzdálenosti objektu můžeme získat jen ve velmi úzkém rozsahu závislém na vlnové délce použitého světla. Nejčastěji se používají interferometry Michelsonův, Sagnacův, Fabry-Peretův, Mach-Zehnderův aj., jenž se liší především ve způsobu rozdělení vlnění na měřené a referenční a podle celkového uspořádání jednotlivých opticko-mechanických prvků. (4)

c) TOF – Time of flight

Metoda měření doby letu odraženého světelného paprsku. Vzdálenost bodu na povrchu objektu resp. jeho souřadnice lze jednoduše stanovit z doby letu světelného paprsku od času jeho vyslání světelným zdrojem, odrazení od snímaného objektu až po jeho zachycení snímaným senzorem. V podstatě se jedná o korelaci rychlosti vhodného referenčního signálu s měřeným modulovaným optickým signálem. Ten může být modulovaný pulzně, pseudonáhodně nebo spojitě. Mezi nevýhody této metody patří skutečnost, že rychlost světla c je velmi

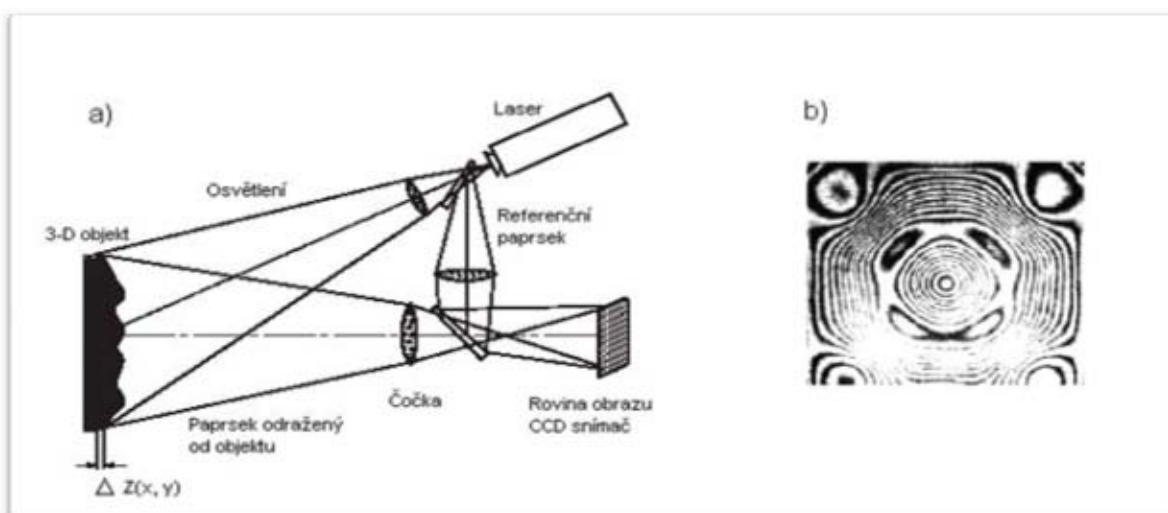
vysoká (cca $3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), z čehož vyplývají velké nároky na přesnost měřicího zařízení. (5)



Obr. 10: Real-time TOF kamera firmy MESA (8)

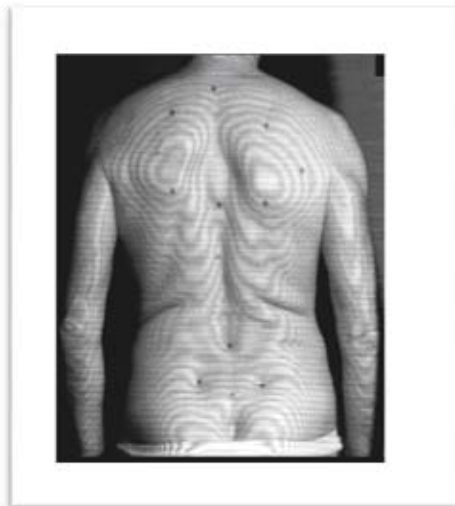
d) Projekce moiré proužků

Skvrny jsou generovány v případě, že koherentní světlo je odraženo od hrubého, nerovného povrchu. Odražené vlnoplochy interferují se všemi dalšími na povrchu detektoru a vytváří tak skvrnitý vzor, který je charakteristický pro drsné povrchové elementy. Jakmile přijde další referenční paprsek, vytvoří se nový vzor, který je přiložen k prvnímu. Vznikne tak skvrnový interferogram.



Obr. 11: Interferometrie: a) typické uspořádání, b) rozdílový interferogram (4)

Poté, co je objekt zdeformován, je vytvořen druhý interferogram. Odečtením tohoto interferogramu od původního obdržíme rozdílový interferogram (Obr. 11b). Vzdálenost mezi proužky koresponduje s relativní vzdáleností objektu. Typické uspořádání takto pracujícího interferometru je zakresleno na Obr. 11a. (3) Tohoto principu se využívá především v medicíně. (4)



Obr. 12: Topologie zad s využitím metody projekce moiré proužků (9)

e) Kontaktní – dotykové scannery

Jak název napovídá, ke snímání povrchu dochází kontaktem čidla s povrchem součásti. Čidlo je upevněno k mechanickému rameni s různými stupni volnosti (nejčastěji 4-6) a umístění bodu v prostoru je určeno díky snímání natočení čidel, umístěných v jednotlivých kloubech ramene. K dotyku čidla dochází ručním vedením – digitizéry, souřadnicové měřicí systémy, nebo motoricky – stacionární souřadnicové měřicí systémy. Využití tohoto typu zařízení je celá řada a zařízení jsou rozšířena pro svoji velkou přesnost a nízkou cenu, vycházející z konstrukce. Typickými představiteli jsou např. scannery Faro, Microscribe či Romer. Měřicí hlavy a prvky pro souřadnicové měřicí systémy vyrábí firma Renishaw. Nevýhodou je někdy zmiňované ruční vedení, které nedovoluje načítání velkého množství bodů. Zařízení nachází uplatnění v designérských kancelářích při načítání jednoduchých tvarových součástí. Stacionární souřadnicové měřicí systémy se využívají především pro přesnou a rychlou kontrolu rozměrů vyrobených součástí ať ve formě samostatného zařízení, či pouze měřicí hlavy jako doplňku více-osých obráběcích center. Je třeba upozornit, že zpětný sběr dat podporuje v zásadě jen řídicí systém Heidenhain a Sinumerik. (10)



Obr. 13: 3D digitizér řady Baces3D firmy FriulROBOT S.r.l. (11)



Obr. 14: Portálový souřadnicový měřicí stroj firmy Mitutoyo (12)

2.3 STL formát dat

STL formát dat je určen pro zobrazování 3D tvaru vyvinutý firmou 3D Systems. Je hojně využíván v oblastech reverzního inženýrství a CAD/CAM aplikacích. STL uchovává informaci o povrchu 3D součásti bez informace o struktuře, barvě či jiných detailech. Využívá kartézského systému souřadnic a povrch popisuje jako soustavu trojúhelníků s definovanou normálou. Obsahuje tedy informaci o vnějšku a vnitřku součásti.

3 DEFINICE PROBLÉMU A CÍLE PRÁCE

Pro úspěšný rozvoj výroby letadel ve firmě UL-JIH s.r.o. je třeba přejít na moderní 3D technologie. Jako vhodný prostředek realizace se jeví využití průmyslového scanneru. Digitalizace letounu by měla výrazně pozitivní efekt pro prakticky všechny složky výroby. 3D model letadla přináší řadu výhod pro konstruktéry a technology.

- Na modelu jsou jasně vidět veškeré vazby jednotlivých komponent, sestav a dílů.
- Při návrhu modifikace či úpravy dílů lze okamžitě ověřit funkčnost bez nutnosti finančně a časově náročných experimentů.
- Přesnost tvaru jednotlivých prvků konstrukce lze zajistit s dostatečnou přesností a dochází k časovým úsporám při ustavování jednotlivých dílů.
- Na základě 3D modelů by bylo možné optimalizovat výrobu, řadu dílů vyrábět modernějšími technologiemi na CNC strojích, což by vedlo k redukci některých pracovišť, snížení potřeby ruční práce, zpřesnění výroby a v důsledku výrazné snížení výrobních časů, potažmo ceny letounu.
- Využití ideálního modelu pro výrobu přesnějších forem.
- Využití modelu pro přesné stanovení obtížně měřitelných rozměrů pro konstrukci.
- Využití modelu pro softwarové pevnostní a jiné výpočty při úpravách, modifikacích konstrukce a pro legislativní využití.

Na základě těchto bodů stanovíme cíle této práce:

- Na základě rešerše volba vhodného prostředku a postupu digitalizace trupu letounu.
- Na základě získaných dat tvorba modelu trupu a křídel s optimalizací tvarů a rozměrů pro další využití za pomoci vhodné technologie.
- Návrh technologie výroby formy pro výrobu přesných forem.
- Definování dalších možností využití 3D dat a jejich využití.

4 IDEA REALIZACE

Kompletní 3D model letounu lze sestavit z následujících prvků:

- Model vnějších ploch trupu,
- modely vnitřní struktury trupu,
- modely mechanických částí trupu, např. mechanismus řízení,
- model křídel, klapek a křidélek,
- model výškových stabilizátorů a kormidel.

Každý z prvků přináší sám o sobě dostatečný přínos pro potřeby výroby. Každá část však vyžaduje odlišný přístup.

Model trupu se skládá z vnějších ploch zaručujících aerodynamický profil, vnitřní struktury přepážek a mechanických částí řízení. Dle známých rozměrů a tvarů přepážek lze do jisté míry sestavit základní strukturu. S pomocí ručních měření na formě či hotovém letounu by bylo lze sestavit 3D model celého trupu. Chyběla by však zpětná kontrola a porovnání, zda tvary přesně odpovídají vyráběným a ověřeným. Další nevýhodou je vysoká pracnost takového postupu. Mnohem vhodnější alternativou se tak jeví využití některé z digitalizačních metod, na jejímž základě by byly vytvořeny plochy trupu, optimalizovány tvary a na základě těchto „ideálních“ tvarů vystavena vnitřní konstrukce letounu.

Samostatnou kapitolu pak tvoří křídla a výškový stabilizátor. Zde se zpětná digitalizace jeví jako zbytečná, protože profil křídla i výškovky je naprosto přesně definován křivkou profilu křídla a čím přesněji bude profil dodržen, tím lépe pro aerodynamické vlastnosti. Zde proto navrhuji využít čistě počítačového vymodelování křídel. A následné propojení s modelem trupu.

Modely vnitřní struktury trupu a mechanických komponent je vhodné modelovat až na základě 3D ploch trupu dle 2D výrobní dokumentace.

4.1 Volba vhodného prostředku digitalizace

Pro sestavení 3D modelu letounu je třeba vhodným scannerem naskenovat trup letounu. Volbu provedeme na základě potřeby splnit následující body:

- Délka trupu a formy trupu je 8 metrů, výška 1,5 metru. Je třeba zajistit přesnost cca $\pm 0,1\text{mm}$ v celém objemu.
- Trup je k dispozici v sídle firmy UL-JIH. Je třeba zajistit dopravu scanneru do firmy či trupu ke scanneru.
- Výsledkem by měl být STL formát pro další využití.
- Je třeba zajistit dostatečné množství dat pro případnou optimalizaci tvarů letounu.
- Je vhodné naskenovat nejen trup, ale i formu pro další měření.
- Dostupnost scanneru a cena. Scanner bude použit jednorázově, není třeba investovat do nákupu velmi drahého zařízení.

V souladu se stanovenými požadavky vylučuji použití dotykových scannerů. Zařízení by muselo být příliš velké, případně by bylo neúměrně pracné přecházení v prostoru. Velmi pracné by bylo i samotné získání dostatečného množství dat pro měření a tvorbu 3D modelu. Ze zbylých dostupných aplikací průmyslových scannerů se jeví jako vhodný kandidát buď optický, nebo laserový scanner. Zajištění dostatečné přesnosti umožňují při dané velikosti skenovaného objektu pouze scannery optické. Na základě konzultace s pracovníky firmy MCAE SYSTEMS, která se skenováním zabývá, volím jako vhodný prostředek digitalizace systémy TRITOP a ATOS německé firmy GOM.

5 REALIZACE

ATOS a TRITOP jsou mobilní optické měřicí a skenovací systémy. Mohou pracovat jak samostatně, tak ve vzájemné kooperaci. Systém TRITOP je primárně určen k měření vzdáleností a umístění bodů v prostoru, systém ATOS je určen pro 3D optické skenování.

Při skenování povrchu rozměrné součásti narážíme na problém, jak zamezit načítání odchylek, které může způsobit velmi výrazný pokles přesnosti. Tuto chybu do značné míry eliminuje využití kombinace systémů TRITOP – ATOS. S pomocí systému TRITOP se načtou přesné souřadnice referenčních bodů na povrchu objektu a vlastní povrch objektu je skenován až posléze. Obslužný software systému ATOS umí s takto naměřenými daty pracovat a s již dostatečnou přesností navazuje skenované plochy na referenční body získané systémem TRITOP. Takovýmto způsobem lze skenovat tak rozlehlé celky, jako automobily či letadla. Výstupem je pak STL formát dat.



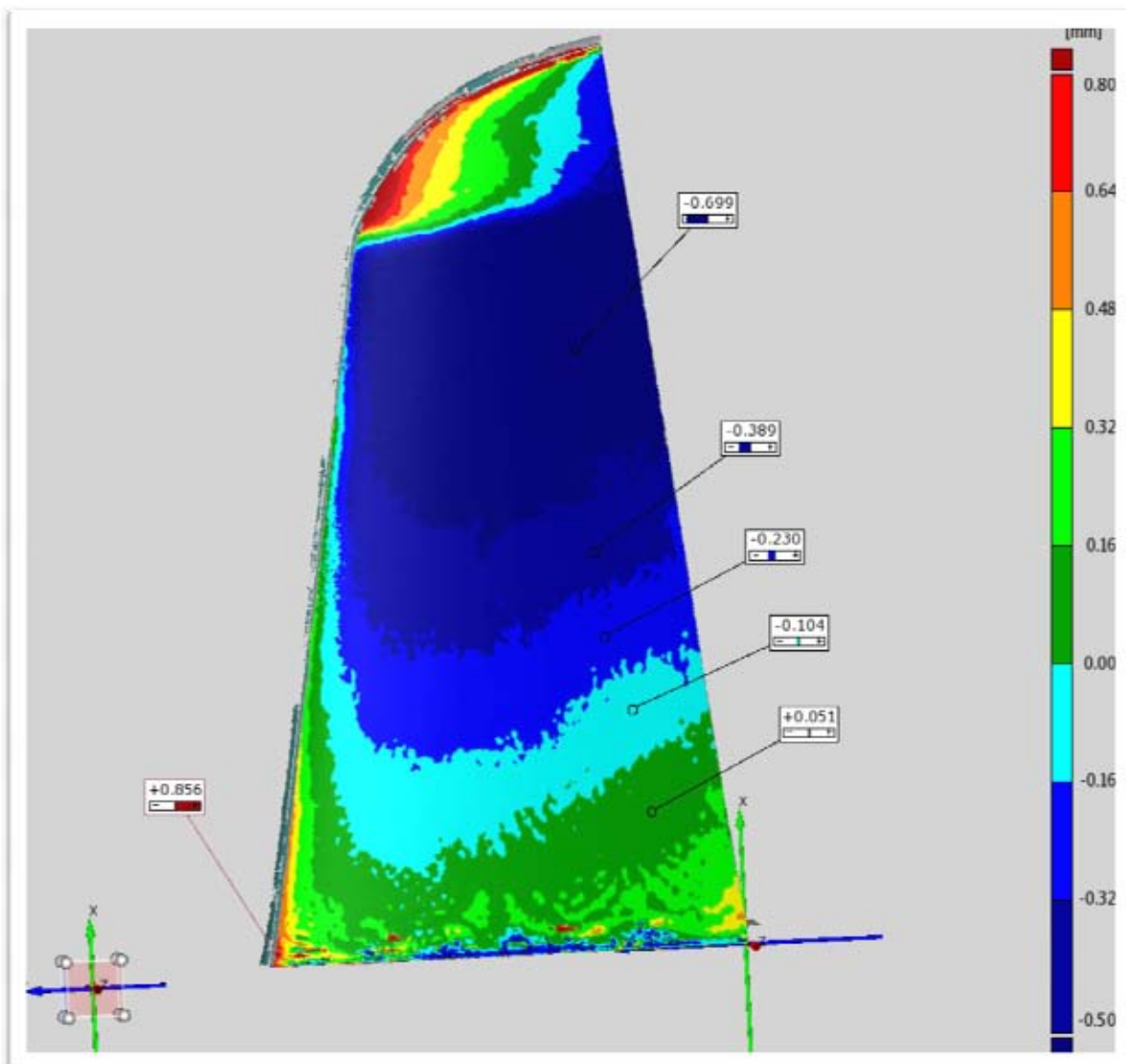
Obr. 15: Stanice systému
ATOS III a TRITOP v terénu

5.1 Porovnání přesnosti TRITOP - ATOS

Abychom prokázali nutnost využití obou systémů, tedy TRITOPu i ATOSu provedeme porovnání přesnosti na výškovém stabilizátoru, který slouží pro testovací účely. (Metodika skenování bude podrobně popsána v kapitole 5.2)

Nejprve naskenujeme součást běžným způsobem, tedy nejprve použijeme systém TRITOP a posléze naskenujeme povrch ATOSem. Tento model použijeme jako referenční. Dále naskenujeme výškový stabilizátor bez systému TRITOP. Přechod mezi stranami stabilizátoru zajistíme body umístěnými na podložce, přičemž stabilizátor je ustaven „na výšku“ (rovina YZ dle Obr. 16). Kompletní model

se skládá cca z osmi skenů z každé strany. Provedeme-li porovnání, dojdeme k následujícímu výsledku:



Obr. 16: Barevná mapa porovnání odchylek skenování s a bez systému TRITOP

Na součásti o výšce 1400mm došlo v extrémních případech k odchylce +0,86 až -0,69mm. Zajímavé je, že tyto odchylky jsou prakticky symetrické dle dělicí roviny stabilizátoru. Minimální odchylka je u kořene výškového stabilizátoru, kde bude výsledek měření ovlivněn přechodem výškový stabilizátor – podložka, na které jsou umístěny referenční body. Dále může být absolutní odchylka ovlivněna zhoršenými světelnými podmínkami při skenování, či nevhodnou povrchovou úpravou. Nicméně je zřejmé, že použitím samostatného scanneru pro větší objekty se dopouštíme jisté chyby, která se načítá s množstvím jednotlivých skenů.

5.2 Skenování letounu

V rámci přípravy je naskenován výškový stabilizátor pomocí školního vybavení, tedy ATOSu I. Naměřená data jsou porovnána s CAD modelem a prezentovány možnosti software. Vlastní skenování letounu je provedeno pomocí TRITOPu a ATOSU III, což je nejmodernější zástupce scannerů ATOS. Vlastní skenování se tedy bude skládat z:

- Skenování výškového stabilizátoru,
- úprava dat a měření rozměrů a odchylek,
- skenování trupu letounu,
- úprava dat a měření rozměrů, odchylek,
- skenování formy trupu letounu,
- úprava dat a porovnání s již hotovým trupem – posouzení změn tvaru.

Křídla letounu nebudou skenována. (viz kapitola 4 Tento postup jsem zvolil jako vhodný kompromis mezi časově náročným a tedy drahým skenováním celého letounu a složitým měřením geometrie bez skenování. Křídlo je tvořeno tažením profilu křídla NACA 23012, výškový stabilizátor je tvořen tažením profilu NACA 64(1)-012. Při uvažovaném využití naskenovaných podkladů při tvorbě dokumentace pro výrobu nové formy bude nejjednodušší vyrobit ideální modely křídel a výškových stabilizátorů.

5.3 Data systému TRITOP

Systém TRITOP je průmyslový optický měřicí systém, který určuje přesné 3D souřadnice diskrétních bodů objektu. Skládá se z kalibrovaného digitálního fotoaparátu Nikon D2x s rozlišením 12,4 mil. pixelů, sady referenčních tyčí, sady kódovaných a nekódovaných bodů a obslužného PC s příslušným software. Princip měření spočívá v nafocení celého měřeného povrchu objektu, včetně referenčních tyčí, kódovaných a nekódovaných bodů a s dostatečným překrytím z různých úhlů. Poté je provedena softwarová analýza fotografií a jednotlivé body jsou přesně zaměřeny v prostoru. Získáme tedy mrak bodů v prostoru, ale bez jakékoli informace o tvarech či struktuře povrchu. Body jsou ale orientovány a lze určit normálu povrchu.

5.3.1 Vlastnosti systému

- Přesnost zařízení je v rozmezí od 0,02 do 0,4 mm.
- Velikost snímaného objektu od 0,1x0,1x0,1 do 10x10x10 m³.
- Provozní teploty od -40°C do 120 °C.

5.3.2 Příprava skenování

Je třeba identifikovat objekt skenování, zvolit vhodné objektivy, vhodnou velikost bodů, metodiku práce, přizpůsobit světelné podmínky.

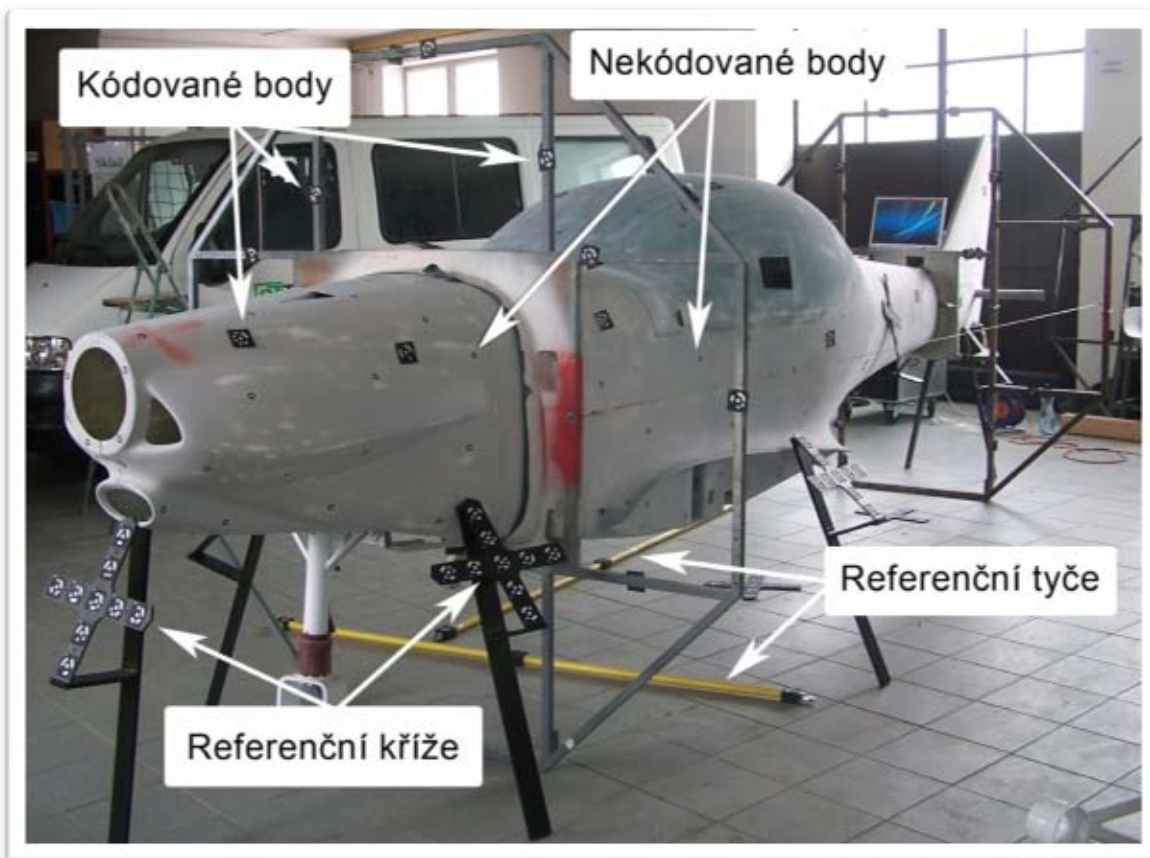


Obr. 17: Trup letounu ve vhodném přípravku pro snadnější manipulaci

- Trup je upevněn v přípravku, který umožňuje vhodnou manipulaci a otáčení trupu kolem podélné osy. Tento přípravek se běžně používá při montáži komponent letadla (Obr. 17).

5.3.3 Příprava skenovaného objektu

Nalepení referenčních kódovaných a nekódovaných bodů na objekt, ustavení objektu v přípravku.

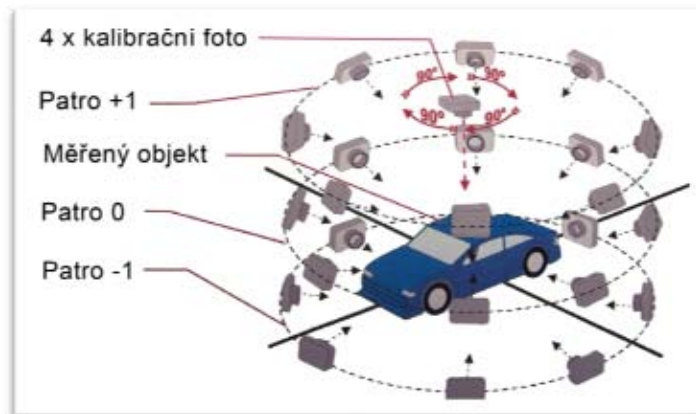


Obr. 18: Letoun připravený pro focení TRITOPem

- Pomocí křídového prášku byl zmatněn překryt kabiny a několik drobných převážně kovových součástí již namontovaných na trupu. Na trup byly umístěny nekódované body velikosti 8mm, kódované body, kříže a referenční tyče systému TRITOP.

5.3.4 Vlastní skenování

Kalibrace a skenování obecných objektů – 4x vyfocení objektu shora, fotoaparát otočíme vždy o 90°, poté focení objektu z mnoha úhlů ve 3 patrech.



Obr. 19: Metodika focení systémem TRITOP

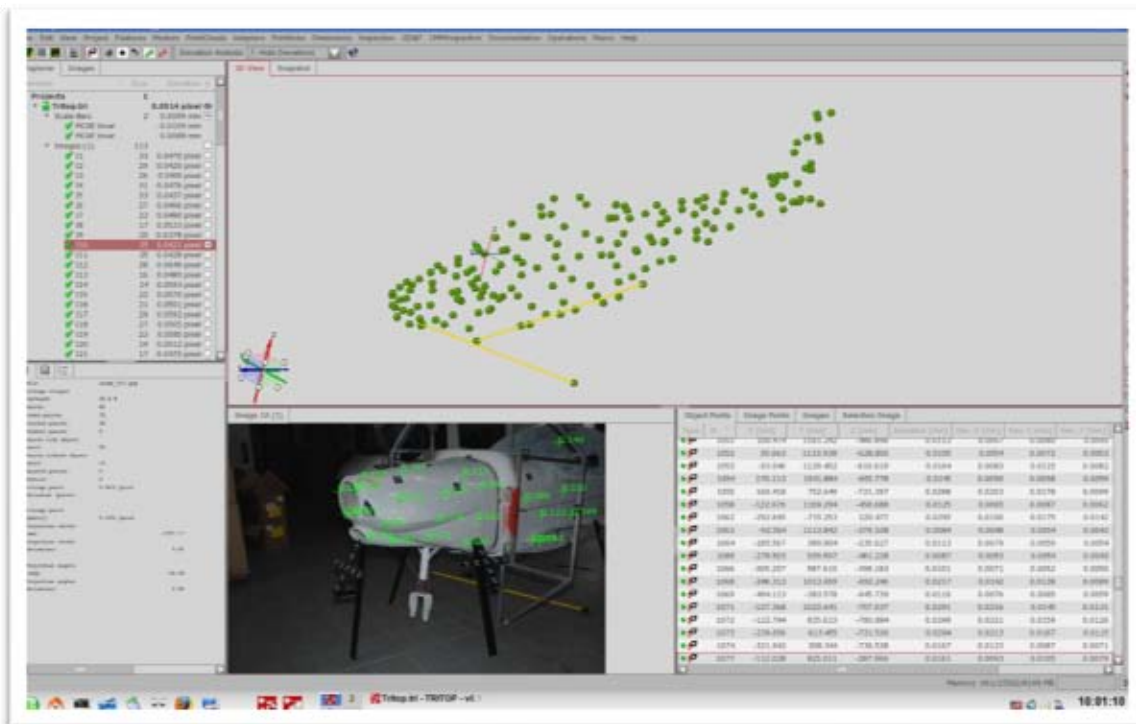


Obr. 20: Reálné provedení

- Trup byl vyfocen systémem TRITOP s využitím běžných pracovních štaflí pro focení z nadhledu, bylo pořízeno 113 snímků.

5.3.5 Zpracování

Ze snímků ve fotoaparátu je třeba vytvořit mrak bodů. Po přenesení fotografií do počítače systém vypočítá jednotlivé souřadnice a výsledek zobrazí. Viz Obr. 21.



5.4 Data systému ATOS

Systém ATOS se skládá z vlastního měřicího zařízení obsahujícího 2 kamery, projektor a výpočetní stanice s obslužným software. Pokud jsou známa data systému TRITOP, mohou být načtena, pokud ne, lze hned po kalibraci začít skenovat. Práce se systémem ATOS odpovídá práci s optickými scannery této kategorie. Je třeba použít dostatečný počet referenčních bodů, povrch musí být matný, pokud možno jednobarevný. Při jednotlivých snímcích z různých úhlů musí systém jednoznačně identifikovat alespoň 3 body pro správné navázání snímků. Čím více snímků je použito, tím větší bude dosažená přesnost.

5.4.1 Vlastnosti systému

- 4 mil. měřených bodů za 2s.
- Měřený objem: 150x150 mm².
- Nejnižší vzdálenost měřených bodů: 0,07-1mm.
- Přesnost od 0,02mm dle konfigurace.

5.4.2 Barevná mapa

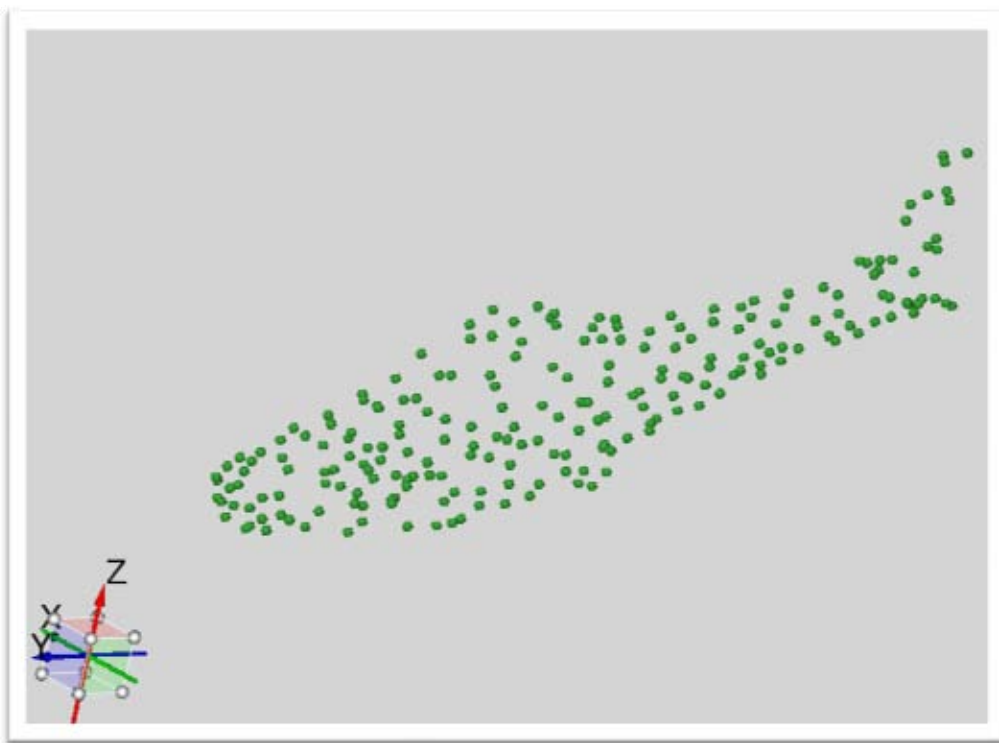
Pro softwarové porovnání tvarů dvou modelů součástí, CAD modelu a modelu součásti, či prvku na modelu součásti s ideálním geometrickým prvkem využíváme tzv. barevných map.

Jednotlivé porovnávané součásti nejprve přesně ustavíme ve shodném souřadnicovém systému a následně překryjeme. Místo ustavení v souřadnicovém systému lze využít tzv. *best fit* funkce, která na základě matematického výpočtu ustaví součásti na sebe tak, že vzdálenosti mezi odpovídajícími si body povrchy jednotlivých součástí jsou minimální možné. Poté je dle zadaných parametrů vygenerována na povrchu překrytých součástí textura, která má následující vlastnost: Po nastavených krocích je určité vzdálenosti mezi měřenými body na povrchu přiřazena určitá barva, či její odstín. Je-li tedy nastaveno, že např. červená barva znamená vzdálenost mezi povrchy větší než dovolenou, uvidíme na povrchu překrytých modelů součástí červenou barvu všude tam, kde je tato vzdálenost překročena. Aby měl výsledek dostatečnou vypovídací hodnotu, je třeba jeden z měřených prvků stanovit jako referenční, tedy takový, který bude systém považovat za ideální a ke kterému bude vzdálenosti měřit.

5.4.3 Příprava skenování

Je třeba identifikovat objekt skenování, zvolit vhodné objektivy, metodiku práce, přizpůsobit světelné podmínky. Před zahájením skenování lze postupovat dle následujících bodů:

- Kalibrace scanneru – je-li třeba – významně ovlivňuje přesnost následujícího měření.
- Příprava skenovaného objektu – je-li třeba – především zmatnění povrchu křídovým práškem, nalepení referenčních bodů na objekt či podložku, ustavení objektu v přípravku.
- Načtení bodů změřených systémem TRITOP.



Obr. 22: Body naměřené TRITOPem načtené v ATOSu

- Kalibrace scanneru nebyla třeba. Scanner byl kalibrován krátce před měřením ještě ve firmě.
- Další úpravy povrchu nebyly třeba, povrchová úprava je shodná se systémem TRITOP.
- Do systému ATOS byly načteny body z TRITOPu. Viz Obr. 22.

5.4.4 Vlastní skenování

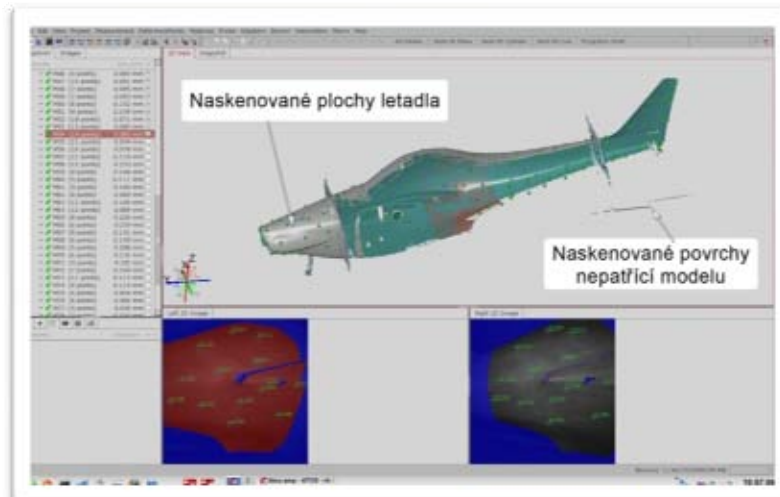


Obr. 23: ATOS III při práci ve stojanu

Skenování trupu proběhlo s využitím standardního měřicího stojanu ATOS o výšce 2 metry. Při skenování byl dáván důraz na dostatečné zachycení několika důležitých montážních a pracovních skupin využitelných při následném zpracování dat. Jedná se především o:

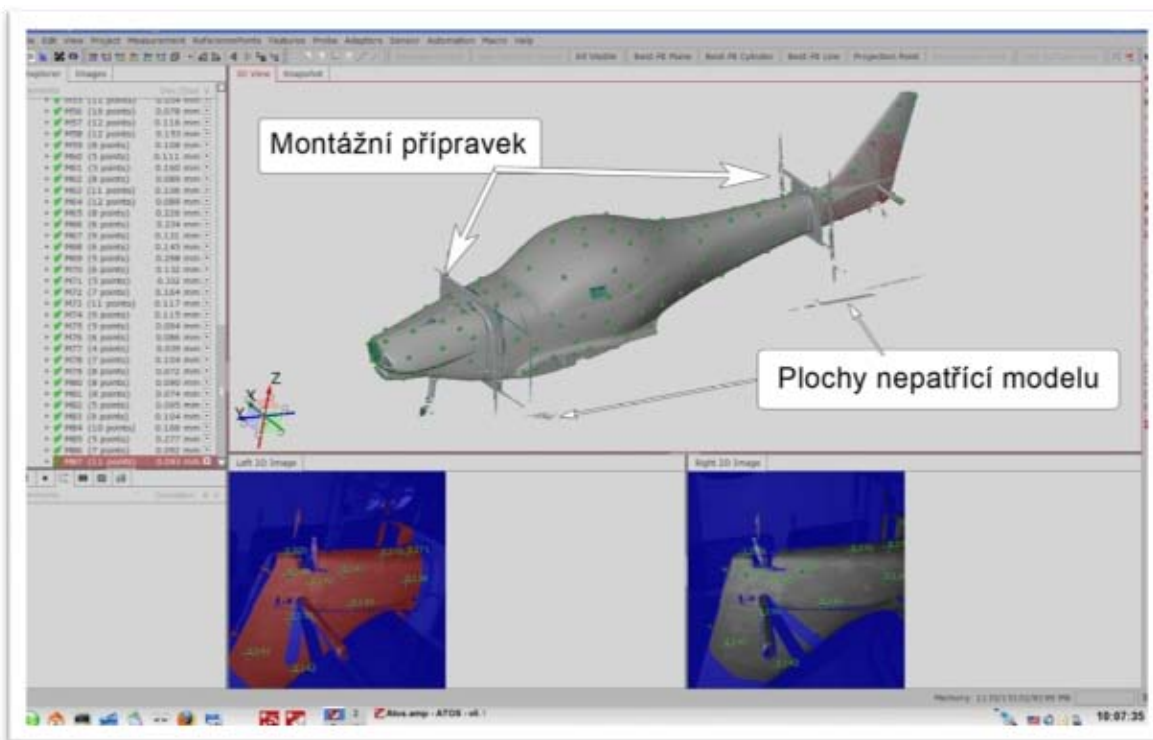
- Vodorovný čep výškového stabilizátoru,
- nosník výškového stabilizátoru,
- hrana rámu kabiny,
- hrana oddělující motorový a osobní prostor – umístění motorové přepážky,
- otvor, kterým vstupují hlavní nosníky křídel do trupu.

Před ukončením práce je vhodné ověřit, že byl objekt dostatečně nasnímán.



Obr. 24: Prostředí systému ATOS při skenování

5.4.5 Zpracování



Obr. 25: Výsledek skenování

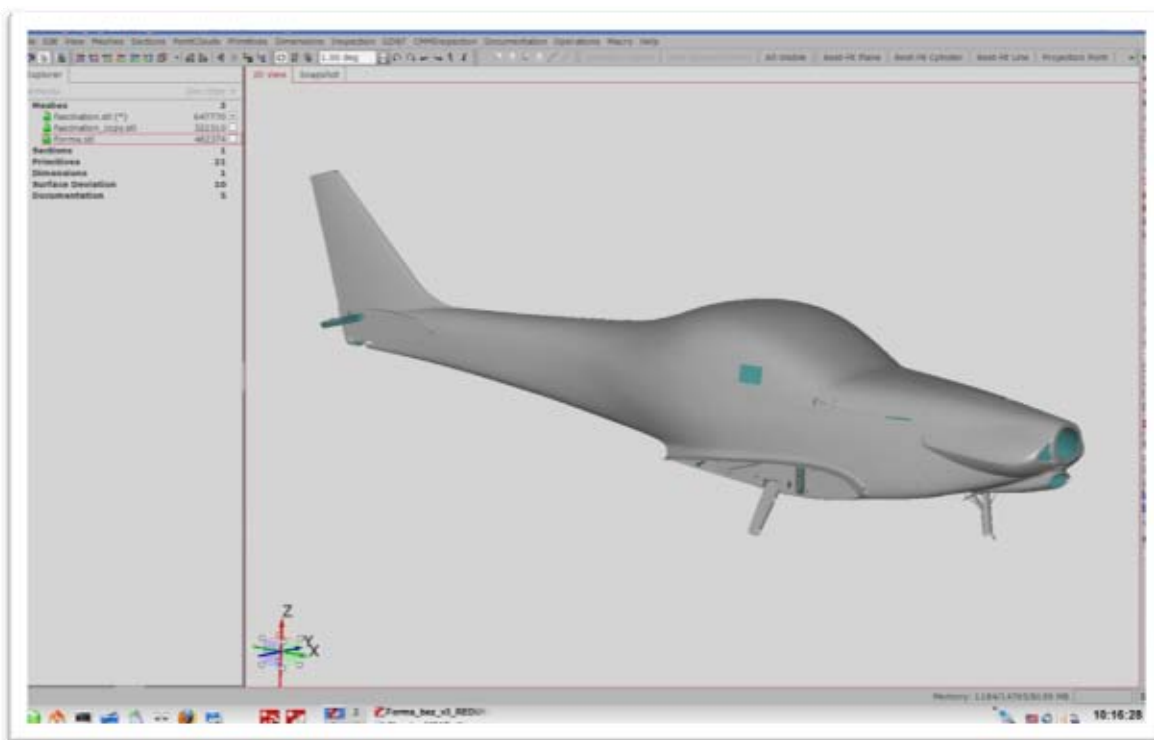
Při skenování byl digitalizován kompletní trup letounu a jedna polovina formy trupu pro drobnější měření a porovnání. Následně byly provedeny tyto úpravy dat:

- Finální propojení jednotlivých snímků – Spojení jednotlivých snímků a vytvoření jednotného povrchu .
- Polygonizace – Povrch je převeden na trojúhelníkovou síť dle zadaných parametrů.
- Zaslepení otvorů po referenčních bodech – Povrch pod referenčními body systém automaticky vynechává.
- Vyhlazení povrchu – Dle potřeby se idealizuje naskenovaný tvar.
- Export STL dílu.

Pro další využití je STL soubor dále upravován.

Objekt se po naskenování skládá z cca 10 milionů bodů a tento počet byl zredukován na 650 tisíc bodů, při zachování maximální odchylky od skutečného tvaru 0,02mm. (Přesnost skenu) Následující operace popisují redukci bodů a vyhlazení povrchu při zachování dostatečné přesnosti:

1. Vyhlazení povrchu (Smooth) na převýšení max. 0,1mm.
2. Redukce tvaru s ohledem na minimální přesnost 0,004mm.
3. Maximální délka hrany trojúhelníku sítě STL stanovena na 2mm.
4. Opětovné vyhlazení povrchu na max. převýšení 0,05mm.
5. Redukce tvaru s ohledem na minimální přesnost 0,002mm.
6. Maximální délka hrany trojúhelníku sítě STL stanovena na 5mm.



Obr. 26: Výsledek úpravy dat

Skenování a základní úprava dat proběhla dne 18. 4. 2009 v areálu firmy UL-JIH s.r.o. Softwarová měření byla realizována později v sídle firmy MCAE Systems s.r.o. a na školním vybavení. Celé vybavení potřebné pro skenování bylo přivezeno osobním automobilem Škoda Octavia. Zařízení obsluhovali dva školení pracovníci. Lze konstatovat, že všechny postupy by byly realizovatelné pouze jedním pracovníkem bez výrazného navýšení času realizace. Celková doba skenování

trupu a poloviny formy trupu byla cca 5 hodin. Časový úhrn jednotlivých operací byl zhruba následující:

Tabulka 1: Doba skenování

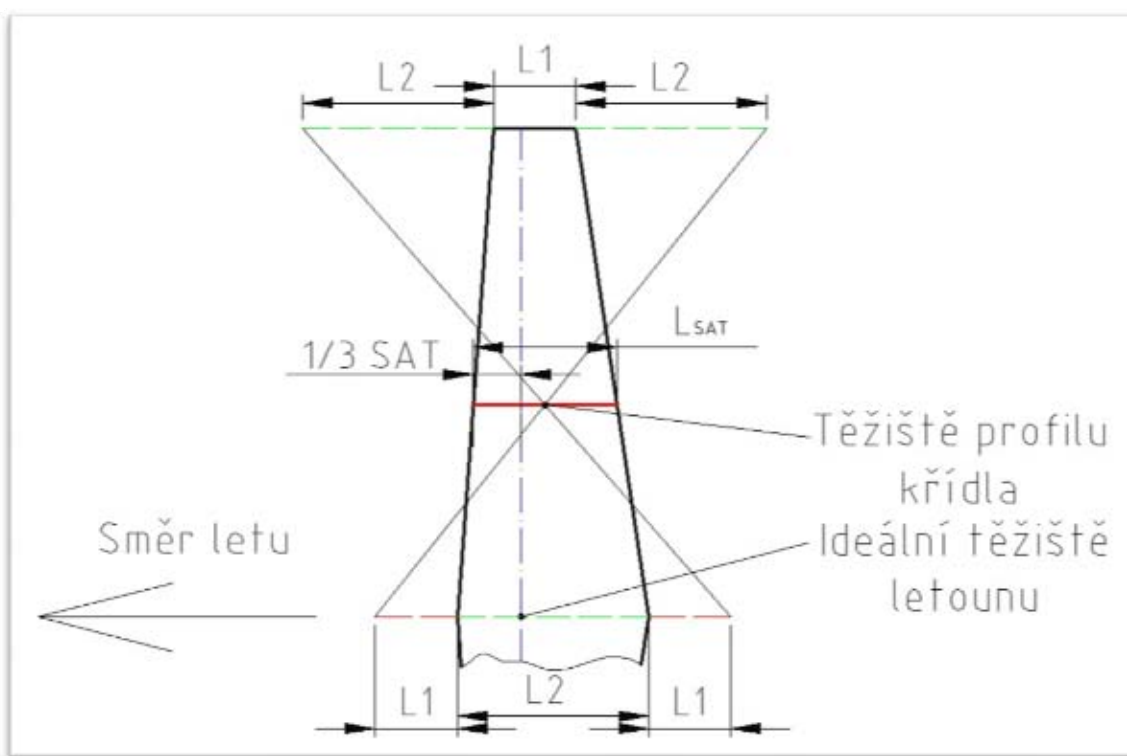
Operace	doba trvání
Příprava	0:15
Sestavení systému ATOS	0:30
Zmatnění částí letadla sprejem	0:10
Zmatnění povrchu formy	0:15
Lepení nekódovaných bodů na trup	0:15
Lepení nekódovaných bodů na formu	0:15
Upevnění kódovaných bodů na trup	0:10
Upevnění kódovaných bodů na formu	0:10
Focení trupu systémem TRITOP	0:15
Focení formy systémem TRITOP	0:15
Přenos dat do PC a zpracování	0:10
Skenování trupu systémem ATOS	1:00
Skenování formy systémem ATOS	0:30
Softwarové výpočty	0:10
Úprava dat, kontrola	0:15
Úklid pracoviště	0:20
Celkem	4:55

6 VYHODNOCENÍ

6.1 Ustavení letounu v souřadném systému

Přesné ustavení letounu v souřadném systému je třeba pro přesné definování jednotlivých komponent v prostoru a pro kontrolní účely. Ve firmě UL-JIH se v současné době nepoužívá žádný zavedený způsob ustavení letounu v souřadném systému. Souřadný systém musí dostatečně vystihnout jak konstrukční, tak funkční aspekt. U letounů klasické koncepce je vhodné zvolit počátek souřadného systému v těžišti letadla, protože těžiště nejvýznamněji ovlivňuje chování letadla za letu a je k němu vztahováno mnoho funkčních rozměrů.

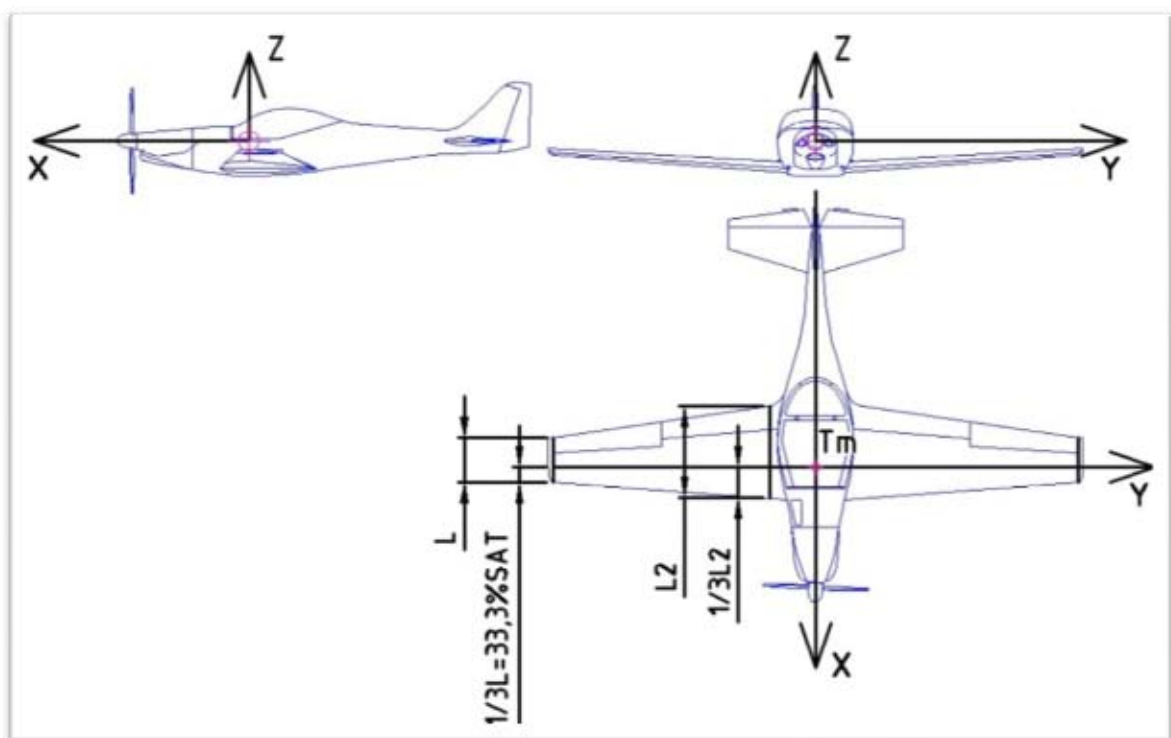
6.1.1 Ideální těžiště letounu



Obr. 27: Těžiště křídla a letounu

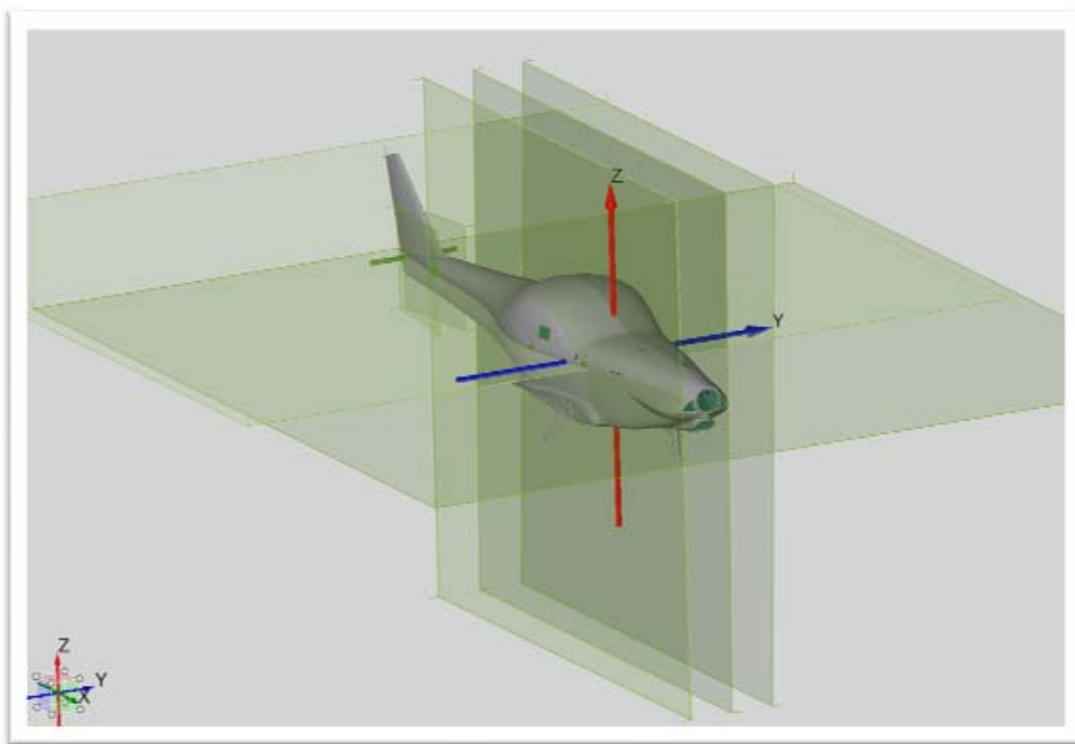
Těžiště coby hmotný střed letounu lze pochopitelně relativně lehce stanovit, ale může se během letu měnit, např. vlivem ubývajícího paliva v nádržích. Nejdůležitějším parametrem umístění těžiště letounu je poloha transversální roviny těžiště, tedy jeho předozadní poloha. Tato poloha je striktně dána konstrukcí křídel, letounu, jeho aerodynamikou a profilem křídla. Pro zjištění polohy těžiště letounu musíme nejprve určit těžiště křídla. Těžištěm křídla prochází úsečka zvaná *střední*

aerodynamická těživa (SAT), a je rovnoběžná se směrem letu. Na této úsečce se vzdálenost těžiště od náběžné hrany křídla neurčuje v exaktních délkových jednotkách, ale v procentech vzdálenosti od náběžné hrany, uvažujeme-li celkovou délku SAT jako 100%. Polohu SAT lze spočítat nebo u jednodušších profilů geometricky zkonstruovat. V případě letounu Fascination je poloha mezi 22-35,7% SAT, ideálně 33,3% SAT, tedy v jedné třetině vzdálenosti od náběžné hrany křídla. Geometrie lichoběžníkových křídel letounu Fascination je konstruována tak, že přímka spojující těžiště křídla prochází ideálním těžištěm celého letounu. Ze známých rozměrů tedy mohu určit polohu těžiště od náběžné hrany křídla. Poloha mediánní roviny těžiště je dána pravo-levou symetrií letounu. Půlí letoun na 2 symetrické poloviny. Poloha poslední, horizontální roviny není striktně určena. Předním požadavkem je, aby byla rovnoběžná s horizontální osou letu, ale její absolutní vzdálenost od křídel není z hlediska provozu letounu podstatná, volím tedy horizontální rovinu procházející osou pohonné vrtule a osou čepu výškového stabilizátoru. Při dodržení pravidla pravé ruky, a uvážím-li směr letu v ose X, bude ustavení letounu v souřadném systému dle Obr. 28.



Obr. 28: Ustavení letounu v souřadném systému

6.1.2 Praktické ustavení



Obr. 29: Model letounu, pomocné a konstrukční roviny a ustavený souřadnicový systém

Nejprve stanovíme rovinu horizontální a to za pomoci naskenovaného čepu výškového stabilizátoru a nosníku (trubky) výškového stabilizátoru. Osa čepu a nosníku musí být za letu vodorovná, vytvořím tedy rovinu ze tří bodů či dvou přímek spojujících středy čepů a středy nosníků pravé a levé poloviny. Provedu kontrolu dle čtyř bodů na rámu kabiny a pomocí osy pro vrtuli v motorovém krytu. Motorový kryt uvažujeme pouze informativně, jeho poloha nemusí být vůči trupu vždy přesně stanovena. Rovina horizontální prochází 2 milimetry od osy což je přijatelný výsledek.

Mediánní rovinu stanovíme pomocí dvou bodů a předpokládané kolmosti k rovině horizontální. První bod bude osou čepu směrového kormidla, druhý bod uvažuji na přední spodní straně trupu coby průsečík roviny symetrie křídelních přepážek a trupu a motorové přepážky.

Transversální rovinu stanovím jako rovinu kolmou k oběma předchozím rovinám a ve vzdálenosti 33,3% SAT, tedy 533 milimetrů od náběžné hrany křídla.

Ustavení formy je o něco komplikovanější vzhledem k nedostatku konstrukčních uzlů. Rovina mediánní je shodná s rovinou dělicí, stanovím ji tedy jako „best fit“ rovinu dělicí. Rovinu horizontální určím z naznačených pozic čepu a nosníku

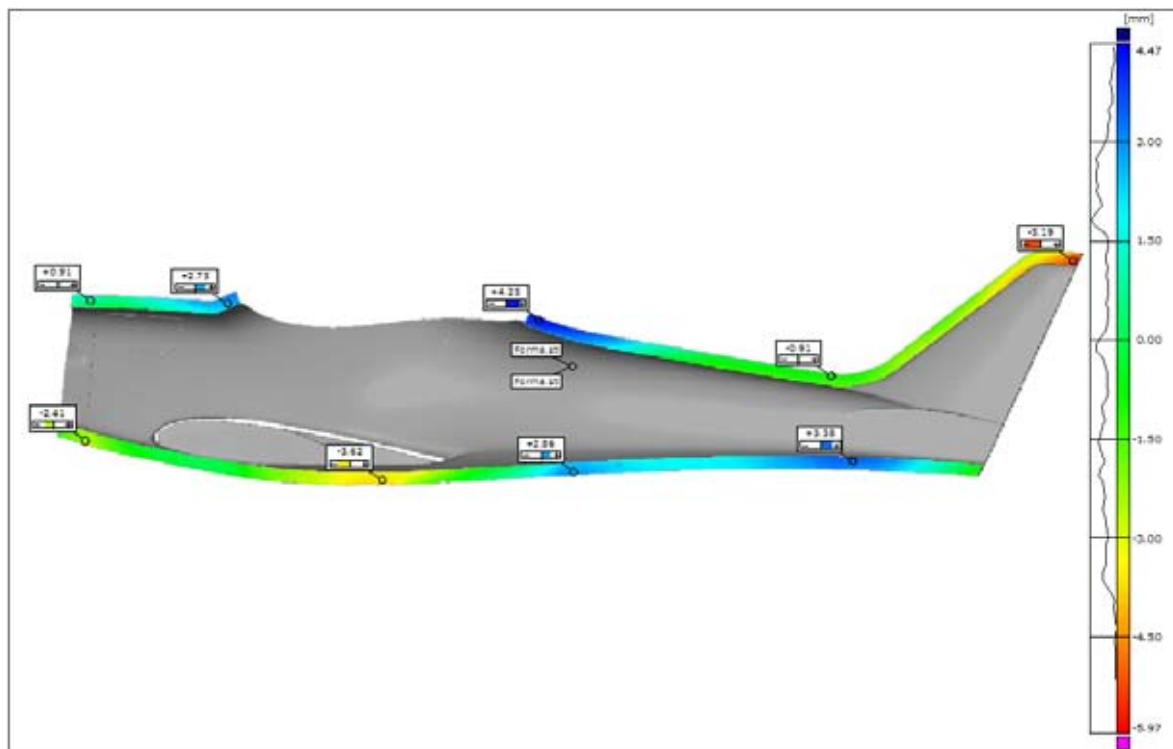
výškového stabilizátoru. Rovinu transversální stanovím obdobně jako u předchozího, tedy kolmou k předešlým a ve vzdálenosti 533 milimetrů od náběžné hrany křídla.

Je třeba zvážit možnost ustavení pouze letounu a formu do stejného souřadného systému ustavit pomocí „best fit“ funkce.

6.2 *Kontrola tvarů trupu a formy*

V rámci zpracování dat byla provedena řada měření na naskenovaných datech. Následující barevné mapy zobrazují výsledky jednotlivých měření.

6.2.1 Odchyłky rovinnosti dělicí roviny formy



Obr. 30: Barevná mapa odchyłek rovinnosti dělicí roviny formy

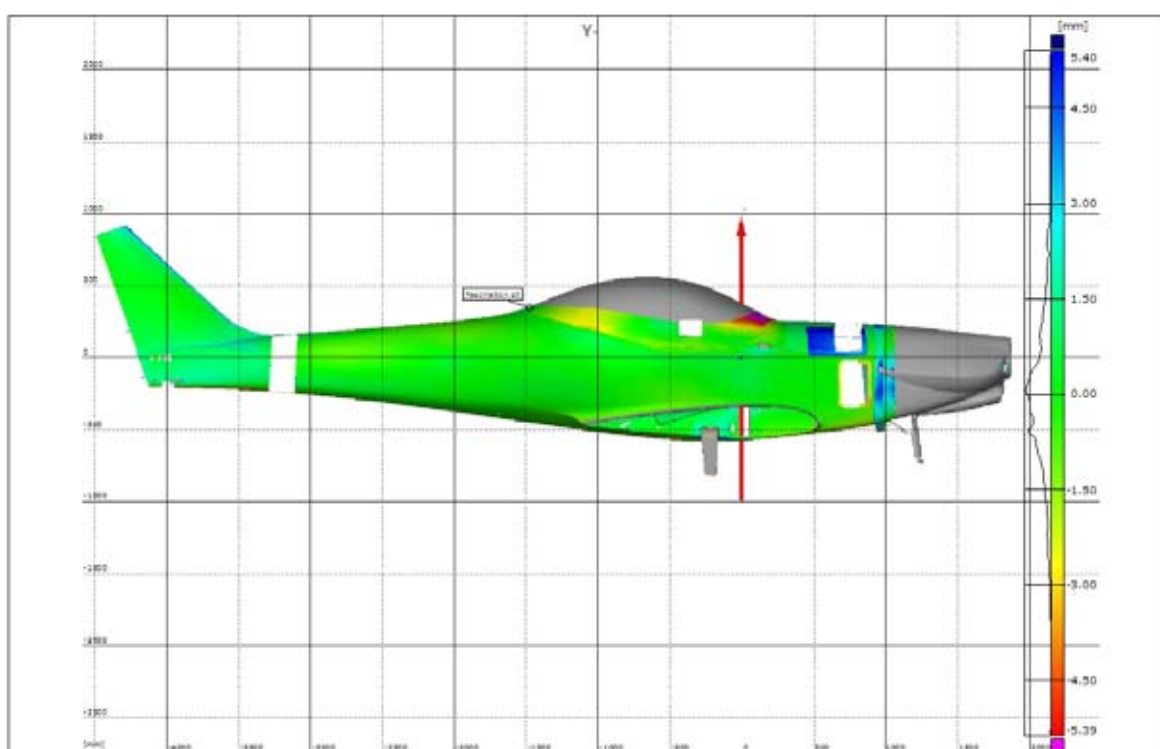
Referenční rovina je geometrickou entitou, je tedy ideálně rovná. S dělicí rovinou je propojena pomocí best fit funkce. Nerovnosti jsou rovnoměrně rozloženy po celém obvodu formy. Maximální hodnota je +4,5mm, minimální potom -3,5mm.

Je příznačné, že k největším nepřesnostem dochází na krajích formy. Tyto části mají největší tendenci vzájemně nedoléhat. Tyto plochy jsou také velmi namáhány častým čištěním od oboustranné lepicí pásky, vytlačeného epoxidu a separačního

gelu. Nepřesnost rovinnosti lze do jisté míry eliminovat důsledným mechanickým spojením formy s protikusem při spojování jednotlivých polovin.

Spolu s úpravou technologie laminování a zpřesnění dělicí roviny na maximální odchylky $\pm 1\text{mm}$ by bylo lze uvažovat o využití technologie barvení součásti ve formě. Tím by odpadla náročná povrchová úprava celého trupu. Kvalitnější povrchová úprava by pak přicházela v úvahu u kusů, u kterých si ji zákazník objedná.

6.2.2 Porovnání poloviny trupu vyjmutého z formy a formy



Obr. 31: Barevná mapa porovnání změn tvaru trupu po vyjmutí z formy

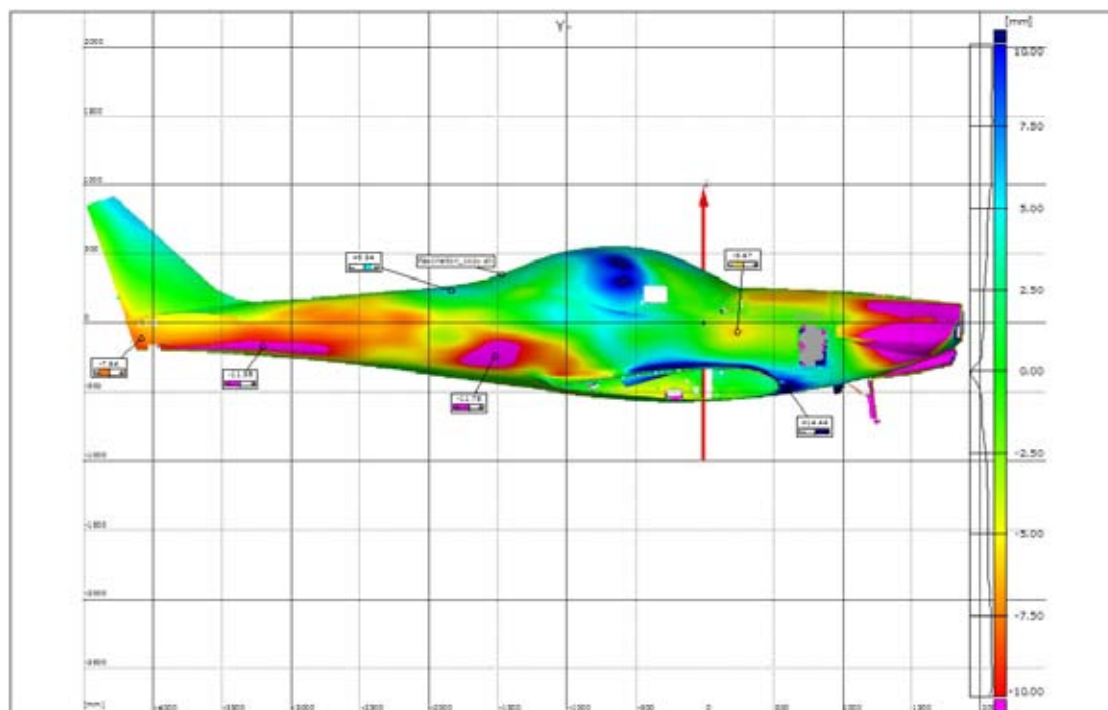
Referenčním objektem byla stanovena forma, u které předpokládám menší, případně žádnou deformaci po vyjmutí trupu. Porovnání změn tvaru trupu pak vychází poměrně pozitivně. Odchylky se pohybují v naprosté většině v desetinách milimetru, extrémní hodnoty jsou jen v několika místech a to $+4\text{mm}$ až -3mm . Jedná se však o lokální nerovnosti. Dobrý výsledek je dán pravděpodobně tím, že přepážky a výztuhy jsou do trupu lepeny ve formě, po o vyjmutí trupu z formy dojde k minimálním změnám tvarů. Nejzřetelnější nepřesnosti jsou v oblastech:

- Kabiny: -3mm - Kabina je díl vyráběný v jiné formě, tvar kopyta na kterém je kabina modelována neodpovídá přesně tvaru formy. Tento jev není třeba odstraňovat, ale bylo by vhodné s využitím 3D modelu vytvořit kvalitnější

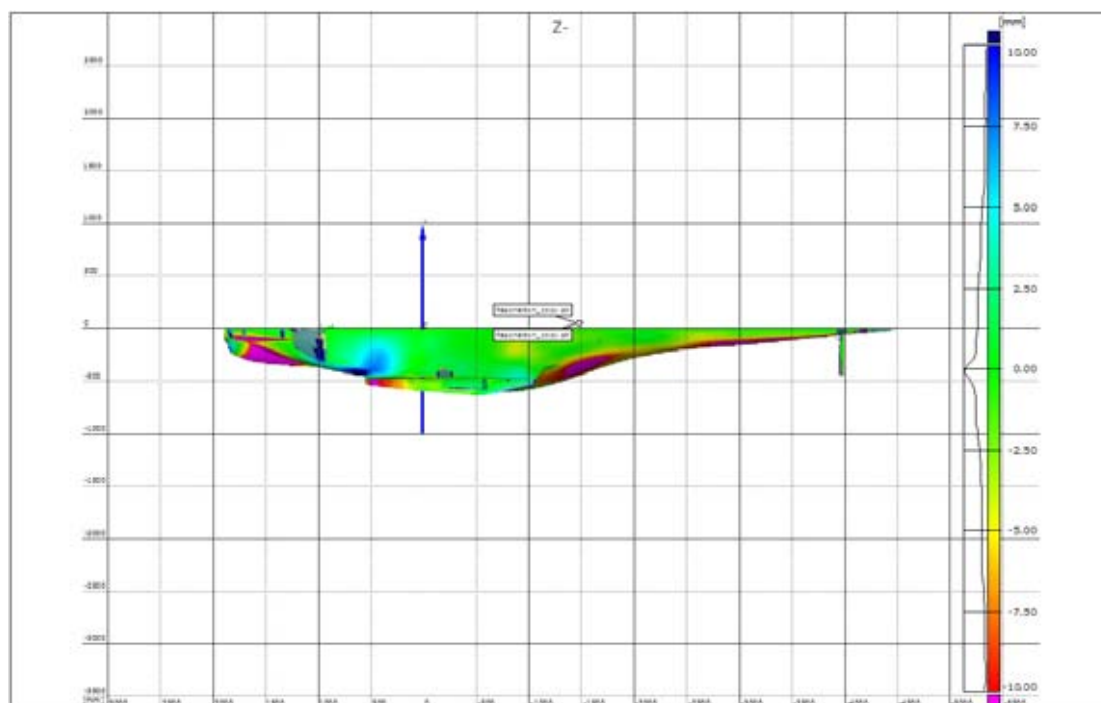
kopyto pro výrobu kabiny a formu na rám kabiny. V této oblasti vzniká v praxi velké množství nepřesností a je potřeba náročné povrchové úpravy, které se snažíme vyvarovat.

- Náběžné hrany směrového stabilizátoru: +4mm - Zde je trup vyztužován dodatečným lepením uhlíkových pásů. Již při konstrukci formy bylo s tímto počítáno a nejedná se tedy o nežádoucí jev. Při konstrukci nové formy bude však potřeba dbát v této oblasti zvýšené opatrnosti. Výškový stabilizátor je silný jen několik centimetrů a je velmi obtížné správně slepit pravou a levou polovinu při spojování pravé a levé části formy.
- Oblast kořene křídla: +3mm - Zde se jedná o poměrně úzkou plochu mezi tvarově složitými hranami. Velký vliv na nepřesnost můžou mít vlepené přepážky podvozku a křídel, které mohou trup v tomto místě lokálně rozpínat. Při laminování je také třeba dbát na důsledné vytvoření vakua v oblasti kořene křídla, případně by bylo vhodné v tomto místě přímo vytvořit odsávací otvor. Dále je třeba dbát pozornosti při lepení přepážek trupu, zda trup nepředepínají. Při konstrukci nové formy bude vhodné v tomto místě nejen vytvářet vakuum, ale i mechanicky působit na lepenou formu např. závažím.
- Oblast kořene výškového stabilizátoru: +2mm – Zde dochází k obdobným jevům jako u předchozího bodu. Jedná se o tvarově složitou plochu, je třeba dodržet stejné body jako u oblasti kořene křídla. Další možnost vzniku nepřesnosti je větší množství kytu použitého při povrchové úpravě. Kyt zbytečně navyšuje váhu a cenu letadla, využití kytu se snažíme vyhnout.

6.2.3 Porovnání symetrie pravé a levé části trupu



Obr. 32: Barevná mapa porovnání pravolevé symetričnosti trupu – pohled -Y



Obr. 33: Barevná mapa porovnání pravolevé symetričnosti trupu - pohled -Z

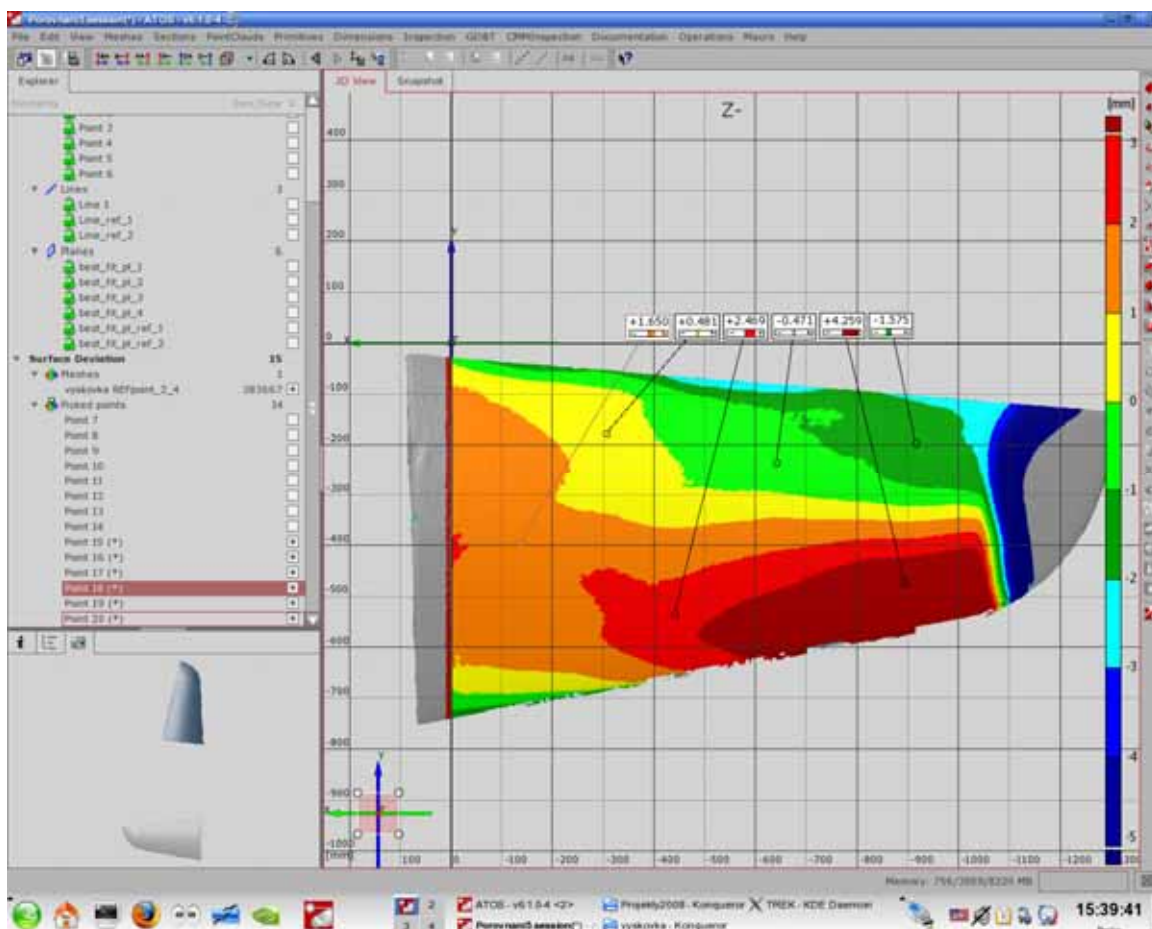
Referenčním objektem byla stanovena pravá polovina trupu, vzhledem k tomu, že se jedná o relativní porovnání. Jak je zřejmé z Obr. 32 a Obr. 33 pravá a levá

polovina se značně liší. Následkem ruční výroby forem jsou nepřesnosti vcelku očekávané. Nejvýraznější nepřesnosti jsou v následujících oblastech:

- Kryt motoru – Indikovaná odchylka -10mm je způsobena několika faktory. Největší vliv má vyosení celého motoru o 3° doprava kvůli kompenzaci krouticího momentu vrtule. Vyosení motoru musí do jisté míry kopírovat i kryt motoru. Kryt motoru se přesně umísťuje až po montáži motoru, který nebyl na skenovaném trupu k dispozici.
- Spodní část trupu za kabinou a spodní část ocasu – Indikované odchylky až -12mm. Zde se projevuje jednoznačně chyba při konstrukci forem na základě polystyrenového modelu. V době vzniku modelu nebyl dbán dostatečný důraz na symetrické vyhotovení trupu, což je z dnešního pohledu pochopitelné, nicméně pro další vývoj nepřijatelné. Právě tyto nepřesnosti značně komplikují montáž dalších komponent do trupu, součásti nemohou být symetrické a je třeba je individuálně pasovat. Na letové vlastnosti nemají tyto nepřesnosti prakticky žádný vliv, protože z aerodynamického hlediska se nejedná o výrazný rozdíl při obtékání trupu. Při konstrukci nových forem je třeba těmto nepřesnostem zcela zamezit, jen tak bude možné zcela využít modernějších technologií při montáži a konstrukci.
- Oblast náběžné hrany kořene křídla – Indikovaná nepřesnost až +15mm. Tato nepřesnost je dána stejným faktorem jako u předchozího bodu. Celkově nepřesnosti v oblasti kořenů křídel velmi komplikují montáž křídel a jedná se o prioritní bod, kde zdokonalit a zpřesnit tvary trupu a kabiny. Lze očekávat výrazně pozitivní efekt při odstranění chyb konstruktérů v této oblasti a to jak v časové úspoře při výrobě, uživatelském komfortu při odnímání křídel a lze očekávat i drobné zlepšení letových vlastností.

Celkově lze konstatovat, že nerovnosti jsou rovnoměrně rozprostřeny a nemají zásadní vliv na letové vlastnosti. Po odstranění těchto odchylek dojde k významné úspoře na ruční práci při montáži, očekávat lze drobné zlepšení letových vlastností, potažmo menší potřebu dovyvážení letounu před předáním zákazníkovi.

6.2.4 Porovnání výškového stabilizátoru s CAD modelem

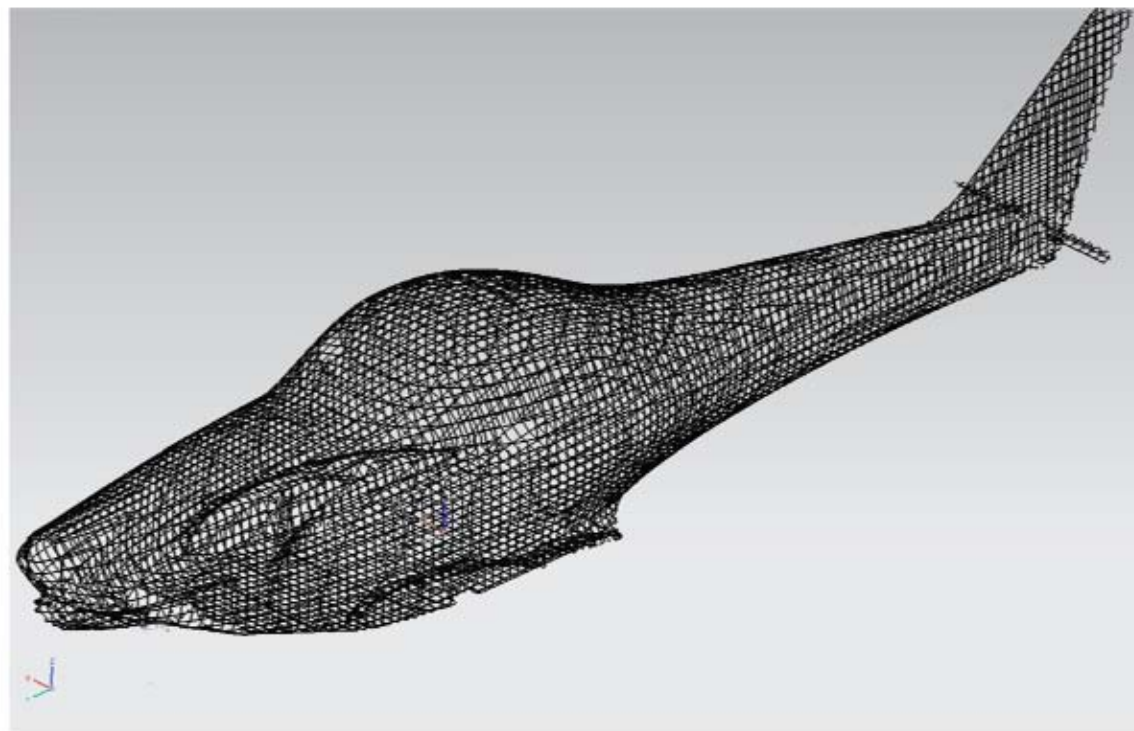


Obr. 34: Barevná mapa porovnání CAD modelu VS a reálné součásti

Referenčním objektem je stanoven CAD model. Porovnání CAD modelu výškového stabilizátoru s jeho reálným provedením je ovlivněno nepřesnými formami výškového stabilizátoru a možným nepřesným ustavením CAD modelu a dat součásti v souřadném systému. Vzhledem k nedostatku prvků, které by byly využitelné při ustavování je využito funkce *best fit*, která ovšem v některých případech nemusí být vhodným prostředkem ustavení. U kořene nepřesahují nepřesnosti 1,5mm, dále od kořene, především na náběžné hraně je odchylka již +4,5mm od CAD modelu. Koncový oblouk již nebyl měřen, nejedná se o funkční část a data k vyhotovení CAD modelu chybí. Při konstrukci nových forem bude využito pouze ideálního CAD modelu a výsledný tvar se bude mnohem více blížit ideálnímu tvaru. Dle zkušeností z provozu letounu lze konstatovat, že výškové stabilizátory jsou vhodně konstruovány a profil křídla NACA je dostatečně dodržen.

6.3 Návrh postupu tvorby modelu letadla a formy

Po vyhodnocení kapitoly 6.2 navrhuji následující postup idealizace tvarů letounu:

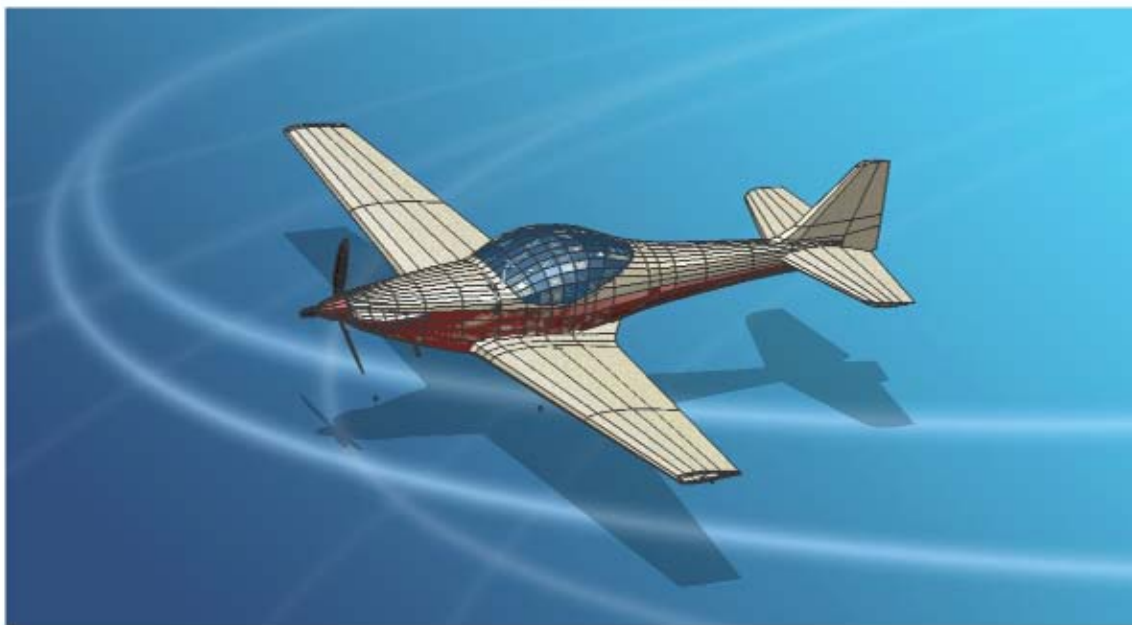


Obr. 35: Síť řezů STL dat

- Zrcadlení 1 poloviny trupu,
- tvorba řezů sítě STL dat (viz Obr. 35),
- vynesení důležitých geometrických prvků z STL dat (motorová přepážka, čepy výškového stabilizátoru, hrana rámu kabiny, roviny kořenů křídel,
- s využitím 3D modelovacího software optimalizace tvarů jednotlivých prvků, případná oprava polohy, tvaru, rovnoběžnosti jednotlivých prvků ,
- na základě optimalizované sítě křivek a prvků tvorba ploch ideálního tvaru trupu,
- tvorba modelu křídel z ideálního tvaru.

Pro optimalizaci tvarů je vhodné využít CAD modelovací software, který podporuje v dostatečné míře technologie reverse engineeringu, např. software CATIA, PRO ENGINEER či TEBIS. Tím lze zkrátit potřebný čas pro tvorbu modelu bez ztráty kvality. Výsledné provedení 3D modelu je zřejmé z Obr. 36. Ve vhodném

software již není problém z hotového modelu letounu vytvořit modely forem jakýchkoli komponent povrchu trupu, křídel či stabilizátorů.



Obr. 36: Hotový 3D model letounu

6.4 Výroba formy

Základními daty pro výrobu formy je 3D model letounu zhotovený dle kapitoly 6.3. Dle konkrétních požadavků firmy, která bude pověřena finálním vyhotovením se vytvoří 3D model formy nebo ploch a následně provede obrobení dle potřeby.

Z výše uvedených měření úprav dat jsou k dispozici data:

- Ideální tvar trupu letounu optimalizovaný na základě skenování,
- ideální tvar křídel na základě ideálního modelu profilu křídla,
- ideální tvar výškových stabilizátorů na základě modelu profilu stabilizátoru.

6.4.1 Požadavky kladené na formu pro ruční vakuové laminování:

- Rozměrová stálost teplotní (do cca 80° Celsia), časová,
- nízká hmotnost pro umožnění ruční manipulace,
- mobilní provedení,
- přesnost,
- nízká cena.

6.4.2 Navrhovaná řešení:

- 1) Výroba modelu trupu z vhodného materiálu za pomoci CNC portálové frézky, ruční laminace formy kolem modelu, následná povrchová úprava formy a její uchycení do přípravku. Tímto postupem by se v podstatě zkopíroval původní postup vzniku forem, ovšem s vyloučením nepřesností způsobených lidským faktorem při tvorbě modelu.
 - o Materiál modelu: Umělé dřevo, polystyren s vrstvou vytvrzené hmoty.
 - o Materiál formy: Kovová konstrukce s laminátovým ložem, obráběná vrstva epoxidu či jiného materiálu.
 - o Klady: nízké náklady na materiál, vyšší přesnost proti stávajícímu stavu.
 - o Zápory: Nízká rozměrová stálost modelu, cena za obrobení modelu CNC technologií, ruční úprava povrchu formy může opět vytvořit nepřesnosti, pracnost.

2) Výroba formy z vhodného materiálu za pomoci 3D CNC stroje, povrchová úprava a její uchycení do přípravku. Tento postup navazuje na předchozí bod a v podstatě jej doplňuje. Vynecháním modelu coby mezistupně mezi ideou a hotovou formou by došlo k dalšímu zpřesnění výsledného produktu.

- o Materiál formy: Kovová konstrukce s laminátovým ložem, obráběná vrstva epoxidu či jiného materiálu.
- o Klady: Přesnost formy, rozměrová stálost formy, využití stávajících technologických postupů zavedených v UL-JIH, pracnost.
- o Zápory: Nutnost úpravy povrchu formy, cena za využití CNC stroje.

3) Úprava stávajících forem na základě porovnání stávajícího stavu s potřebným ručně, nebo s využitím 3D CNC frézky. Jednalo by se v podstatě o využití stávajících forem coby podkladu pro nové formy. Formy by bylo lze opatřit dostatečnou vrstvou epoxidu či jiného materiálu vhodného na výrobu forem (Raku tool).

- o Klady: Cena, není třeba konstruovat nové lože.
- o Zápory: Náročná úprava stávajících forem pro splnění všech parametrů, nebude zaručena dostatečná kvalita povrchu vlivem nestejnorodosti obráběného podkladového materiálu, neúměrné navýšení hmotnosti, nelze uplatnit rozsáhlejší úpravy.

Firma UL-JIH předpokládá výrobu nových forem pro všechny důležité součásti letadla. Jedná se tedy o formy trupu, křídel, výškových stabilizátorů, výškových kormidel a formu hlavních nosníků křídel. Vzhledem k potřebě velkého množství inovací a zdokonalení vyloučíme bod 3). Bylo by velmi obtížné v dostatečné kvalitě opravit formy a obrobit v nich nové tvary. Velikou přesnost spolu s dobrou kvalitou povrchu formy zaručí výroby formy dle bodu 1). Zde však zůstává veliký prostor pro chyby vycházející z následné ruční výroby forem, nehledě k velké spotřebě materiálu modelu. Tato technika by byla využitelná, pokud by se vyráběly formy

pouze např. na trup. Za současného stavu vychází nejlépe varianta 2). Vyloučením lidského faktoru z výroby základu formy bude přesnost forem udržena na vysoké úrovni. Potřeba ruční práce bude pouze při závěrečné povrchové úpravě formy, jejím leštění a drobných úpravách. Na základě předchozích zkušeností z výroby, je vhodné ponechat stávající principy práce s formami a s jejich manipulací. Konstrukce takové formy pro velkou součást (trup, křídlo) bude následující:

- Svaření železné konstrukce z profilů,
- umístění laminátového základu vyrobeného na základě šablony,
- nanesení vrstvy epoxidu či jiného vhodného materiálu (Raku tool),
- obrobení na portálové CNC frézce,
- ruční dokončení forem, leštění, navrtání otvorů pro odsávání vzduchu, zalepení sítě kovových trubic pro odsávání.

Konstrukce formy drobnějšího dílu bude obdobná, není však třeba svařovat železnou konstrukci pro formu, postačí dostatečná vrstva podkladového laminátu.

Před finálním vyhotovením forem budou zváženy možnosti využití dalších modernějších technologií, především možnost předehřívát formu např. teplou vodou sítí trubic či využití metody vakuové infuze. Tyto změny však výrazně neovlivní výsledné vyhotovení formy a lze je do hotových forem implementovat i později.

7 EKONOMICKÉ HODNOCENÍ

Ekonomické hodnocení provedeme pouze na základě odhadů z dostupných zdrojů. Lze očekávat, že celkové náklady na skenování trupu letounu dosáhnou částky 50 000,-Kč. V této částce se silně odrazí vysoká pořizovací cena scanneru a v neposlední řadě potřebná vysoká kvalifikovanost obsluhy.

Předpokládaná částka při tvorbě modelu jinou cestou bude jistě obdobná. Při očekávaném nasazení jednoho pracovníka, který by odměřoval komponenty trupu a tvořil jejich modely by trvalo sestavení kompletního modelu dle kvalifikovaného odhadu dva měsíce. V této době by se však nemohl pracovník podílet na jiných složkách výroby. V porovnání s pěti hodinami práce se scannerem se toto řešení jeví mnohem náročněji.

Dalším bodem dokládajícím vhodnost využití scanneru je množství naskenovaných dat, využitelných pro měření a další využití. V případě že by se získávalo více dat, např. skenováním dalších komponent letadla, jeho mechanických částí či dalších prvků, vhodnost rozhodnutí použít scanner by se ještě zvýšila.

Investice do výroby nových forem nebude vysoká, mechanické provedení bude realizováno v rámci výroby. Nákupní cena materiálu na korpusy a konstrukce nepřesáhne 20 000,-Kč. Náklady na hodinu provozu portálové frézky kolem 500,-Kč poté určují cenu za vyhotovení forem. Dle odhadu bude pořizovací cena 100 000,-Kč.

Návratnost celkové investice se pohybuje v řádu několika vyrobených kusů letounů, při současném objemu výroby tedy několik měsíců. Bude-li využito všech možností, které nabídne přechod na 3D technologie dojde k razantnímu snížení potřebné doby výroby a významnému snížení částek za ruční práci a povrchovou úpravu.

8 ZÁVĚR

Využití metod reverzního inženýrství je vhodným nástrojem pro zpětnou rekonstrukci a tvorbu chybějící 3D dokumentace. Optické scannery jsou prakticky jediným prostředkem, jak převést do 3D prostředí natolik rozměrný objekt jako je ultralehké letadlo. Při dostatečném množství informací je pak vhodné kombinovat data získaná skenováním s ideálním 3D modelem vytvořeným na základě 2D dokumentace.

Na základě skenování skutečného objektu lze také provést řadu měření za pomoci vhodného software. Tato měření by byla v praxi s jinými prostředky buď velmi obtížně proveditelná, nebo by nebyla realizovatelná vůbec.

Vyšší cena za nákup či pronájem scanneru je kompenzována rychlostí skenování a kvalitou výstupních dat. Možnost pronájmu scanneru eliminuje nutnost zařízení kupovat a využít jednorázově.

V této práci je prezentován postup, jak za pomoci systémů TRITOP a ATOS naskenovat ultralehké letadlo a spolu s další 2D dokumentací vytvořit jeho 3D model pro potřeby měření a výroby. Výstupem je pak užití 3D modelu při návrhu a výrobě nových, přesnějších forem pro výrobu trupu letadla a popis dalších možností aplikace získaných dat. Zároveň byla na sérii měření naskenovaných údajů potvrzena a zdůvodněna nutnost tohoto kroku. Předpokládaná výše investice do výroby nové formy je pak naprosto minimální ve srovnání s úsporami, které přináší komplexní přechod na 3D technologie ve výrobě těchto letadel.

Vhodným navázáním na tento projekt by bylo využití optických měřících systémů pro dynamické děje a měření deformace základních prvků konstrukce letounu např. v aerodynamickém tunelu při provozních rychlostech či měření odezvy jednotlivých komponent při extrémních polohách ovládacích prvků letounu.

9 CITOVANÁ LITERATURA

1. **UL-JIH s.r.o.** Prezentace firmy UL-JIH. *web UL-JIH*. [Online] [Citace: 21. Duben 2009.] www.uljih.cz.
2. **Véle, Filip.** *Verifikace pohybů frézky FCM 22 CNC v systému NX*. Vedoucí Ing. Jan Tomíček. Bakalářská práce v oboru "Strojírenská technologie". Praha: ČVUT-FS, Ústav strojírenské technologie. 2007.
3. **LAA ČR.** Web LAA ČR. *Stránky Letecké amatérské asociace*. [Online] [Citace: 1. Duben 2009.]
<http://www.laacr.cz>
4. **Kalová Ilona, Horák Karel.** *elektrorevue*. [Online] [Citace: 22. Duben 2009.]
http://www.elektrorevue.cz/clanky/03013/kap_2.htm.
5. **Tišnovský, Pavel.** *Elektrorevue*. [Online] 2009. [Citace: 1. Květen 2009.]
<http://www.elektrorevue.cz/clanky/03013/index.htm>.
6. **GOM mbH.** *TRITOP v 5.1.1 User Manual*. Braunschweig, Germany. 14. 04. 2003.
7. **Creaform 3D.** *Creaform*. [Online] [Citace: 5. Květen 2009.]
<http://www.creaform3d.com/en/handyscan3d/default.aspx>.
8. **Geoatic inc.** [Online] <http://www.geomagic.com/support/resources/>.
9. Patobiomechanika a patokinesiologie. [Online]
http://biomech.ftvs.cuni.cz/pbpbk/kompendium/rhbengn/sw_diagnostika_moire.php.
10. **Drlík, Karel.** *Aplikace reverzního inženýrství při rekonstrukci strojních dílů*. Diplomová práce v oboru "Strojírenská technologie". Brno: VUT-FSI, ústav strojírenské technologie. 2006. 84s.
11. **Baces.** *Baces*. [Online] [Citace: 4. Duben 2009.] <http://www.baces3d.com/>.
12. [Online] <http://www.semeko.cz/>.
13. **Nesvadba, Roman.** *3D Laser scanner*. [Online]
<http://www.nesquick.net/36NM/index.html>.
14. [Online] http://en.wikipedia.org/wiki/Main_Page.
15. **Simple 3D.** [Online] [Citace: 1. Květen 2009.] <http://www.simple3d.com/>.

SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA 1: PŘÍLOHA TYPOVÉHO PRŮKAZU

PŘÍLOHA 2: PREZENTAČNÍ LETÁK

PŘÍLOHA 3: BAREVNÉ MAPY V PLNÉ VELIKOSTI