

APPLICATION OF THE REVERSE ENGINEERING IN THE SPHERE OF BIOMECHANICS

M. Kubíček¹, Z. Florian²

Summary: *During reverse engineering, a point cloud typically acquired using scanning techniques is used as a basis for constructing 3D CAD surface data from a physical model. This enables a considerable speed-up of the design and construction process as well as an early quality control of the physical model through comparison of physical object data with CAD surface data. Using the digitizing system ATOS (Advanced Topometric Sensor), object can be measured quickly and with high local resolution. Each single measurement generates up to 1.3 million data points (ATOS II). The individual measurement images are merged via reference points (circular markers) and the measured data is made available as point clouds, sections and STL data. The ATOS systems mainly consists of the sensor comprising two cameras, projector and stand, the control unit for the sensor head and a high-performance PC.*

1. Úvod

Se stále vzrůstajícími požadavky v oblasti průmyslu, elektroniky, medicíny atd. na design, kvalitu, přesnost, rychlost a cenu roste význam pojmu reverzní inženýrství (RE). Využitím některé z technologií reverzního inženýrství lze podstatně rychleji a jednodušeji dospět ke zdárnému řešení vzniklých problémů.

Co však pojem reverzní inženýrství znamená? Uvědomíme-li si podstatu klasického strojírenského procesu, který vychází z CAD modelu a končí výrobou součástky, pak proces reverzního inženýrství je přesně opačný.

Samostatný proces převodu fyzické součásti do digitální podoby se nazývá digitalizace. Všeobecně můžeme digitalizaci považovat za převod analogových dat (například geometrie daného předmětu) na data digitální, která v případě potřeby mohou být nadále zpracovávána.

Jednotlivé techniky 3D digitalizace pak mohou sloužit k převedení již vytvořených modelů designérským studiem, ke zpětné kontrole tvarů a rozměrů vyrobené součásti, ke zdokumentování stávajícího stavu a pro rychlou výrobu modelu metodami Rapid Prototyping (RP). Mezi další výhody 3D digitalizace patří možnost převedení skutečné součásti do digitální podoby a následné ověření mechanických vlastností metodami MKP.

¹ Ing. Martin Kubíček : Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky, VUT FSI v Brně, Technická 2, 61669 Brno, tel.: +420 54114 2871, e-mail: kubajunior@email.czT

² Ing. Zdeněk Florian, CSc.: Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky, VUT FSI v Brně, Technická 2, 61669 Brno, tel.: +420 54114 2863, e-mail: florian@fme.vutbr.cz

Zařízení umožňující digitalizaci dat se obecně nazývají skenery. Princip většiny těchto zařízení je založen na snímání povrchu daného objektu v diskrétních bodech, z čehož vyplývá, že měřený objekt je v počítači prezentován jako velký počet bodů v prostoru, tzv. mrak bodů. Jednotlivé skenery se pak vzájemně liší způsobem, jakým snímají body povrchu tělesa.

Dle způsobu snímání bodů se skenery rozdělují do dvou hlavních skupin na skenery kontaktní a bezkontaktní.

✗ MicroScribe	}	kontaktní skenery
✗ skenovací FARO rameno		
✗ Renishaw snímací sondy		
✗ optické skenery	}	bezkontaktní skenery
✗ laserové skenery		
✗ ultrazvukové skenery		
✗ rentgenové skenery		

Výše zmíněné typy snímacích zařízení patří do kategorie skenerů nedestruktivních tzn., že snímání objektu není při digitalizaci nijak poškozen. U skenerů destruktivních dochází při skenování ke zničení skenovaného objektu. Naproti tomu však lze naskenovat i složitou vnitřní geometrii.

2. Formulace problému a cíl řešení

Nároky na kvalitu a přesnost geometrie výpočtových modelů pro potřebu biomechaniky neustále stoupají. Proto je třeba i v této oblasti medicíny využívat hardware umožňující zachytit geometrii s dostatečnou přesností.

Pokud se jedná o model geometrie samotných kostí nebo fyziologických tkání, je zde možnost využít některé z technik doposud užívaných v lékařství. V takových případech bývá velice často používána počítačová tomografie (CT). Počítačová tomografie kombinuje klasické rentgenové vyšetření s počítačovým systémem, který informace zpracovává. Snímek se tedy jednoduše neexponuje na rentgenový film (jako u obyčejného RTG vyšetření), ale je matematicky vyhodnocen a zobrazen do nejmenších detailů.

Podobně jako počítačovou tomografií, lze k získání modelu kostí využít některou z technik reverzního inženýrství. Navíc nám tyto metody umožňují vytvořit geometrický model implantátů, jejichž část je vyrobena ze slitiny kovů. To je bohužel pomocí počítačové tomografie nebo magnetické rezonance nemožné.

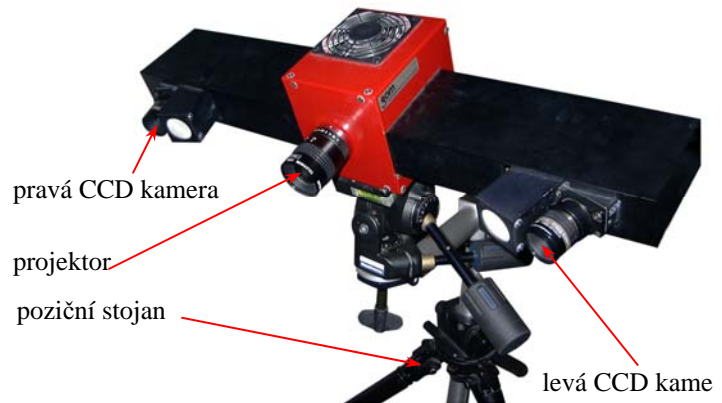
Naším cílem je získat model geometrie dolní čelisti (mandibula) (obr.1) a podrobněji se seznámit s metodou tvorby virtuálních 3D modelů pomocí optického skeneru ATOS.

3. Optický skener ATOS

ATOS (Advanced Topometric Sensor) je mobilní bezdotykový optický skener německé firmy GOM. Nejdůležitějšími součástmi systému ATOS jsou dvě CCD kamery, projektor, kontrolní jednotka a poziční stojan, umožňující snímání objektu z různých úhlů (obr.2). Díky své flexibilitě umožňuje ATOS měřit objekty různých velikostí, počínaje drobnými několikamilimetrovými předměty až po celé letadlo. Pro svoji vysokou výkonnost a velké rozlišení je nejčastěji používán v systémech CAD, CAM a FEM, kde je především využíván k měření reálných objektů a jejich následné analýze.

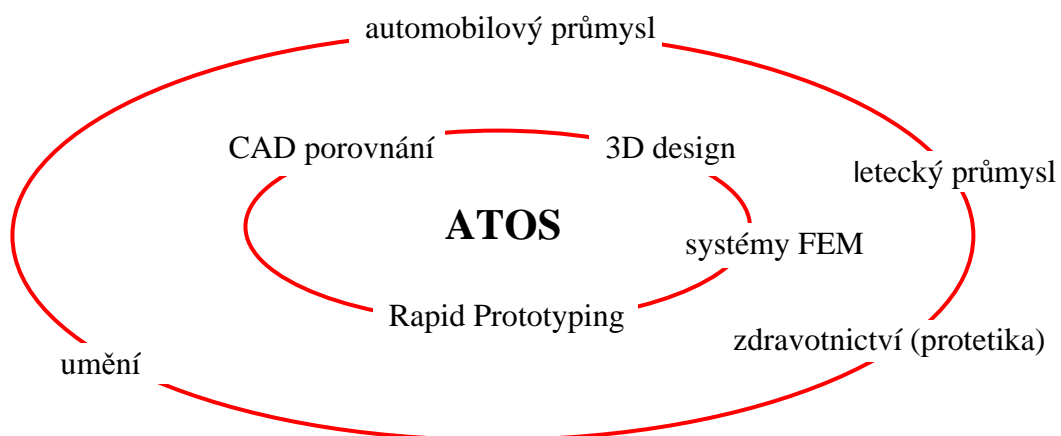


Obr.1 Dolní čelist



Obr.2 Optický skener ATOS

Data získaná pomocí skeneru ATOS jsou nejčastěji využívána v konečnoprvkových systémech pro zjištění mechanických vlastností měřeného objektu, ke kontrole kvality (Quality Control), kde je naskenován fyzický výrobek a zpětně porovnán s výchozími CAD daty a k dokumentaci stávajícího stavu objektů. Toho lze například využít v oblasti umění. Další velkou skupinou využívající přednosti 3D skeneru ATOS jsou designéři. Optický skener se ukázal být nezbytnou pomůckou pro převod hliněných modelů do virtuální podoby. Naskenovaná data pak mohou sloužit jako vstupní data pro zařízení umožňující rychlou výrobu prototypů (Rapid Prototyping).



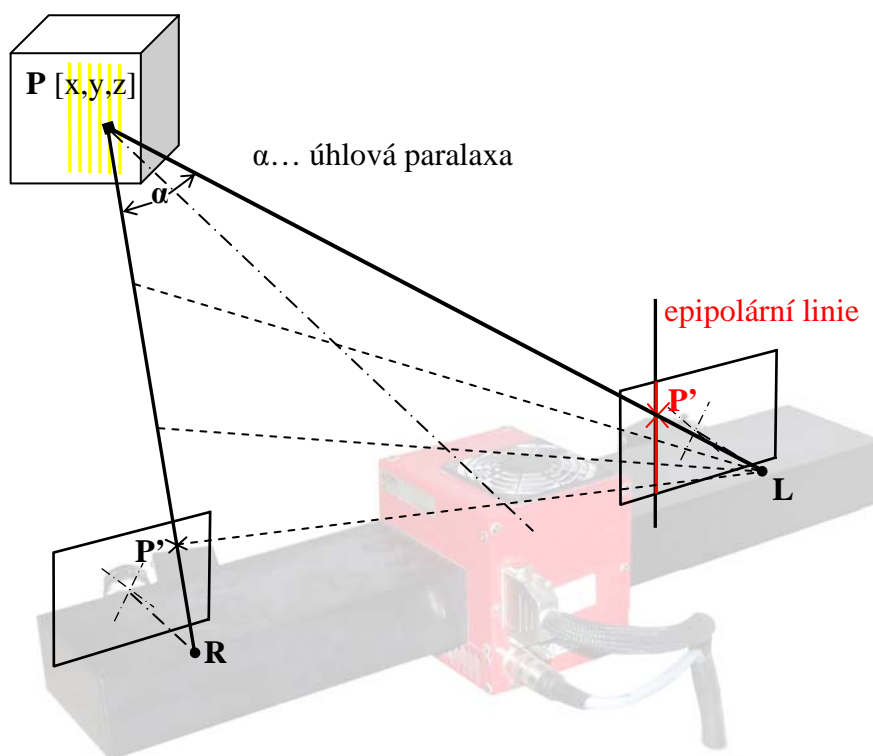
Obr.3 ATOS - využití

Princip měření

Technika spočívá ve fotogrammetrické rekonstrukci snímaného objektu nasvícením jeho povrchu aktivním světelným zdrojem a současným snímáním CCD kamerami. V průběhu vlastního měření jsou na povrch snímaného předmětu promítány pruhy světla, jejichž šířka se postupně mění. Pomocí digitálního zpracování obrazu (filtr typu horní propust) je nalezena hranice mezi „světlým“ promítaným pruhem a „tmavým“ povrchem objektu.

Každý bod na této hranici pak musí být identifikován na snímku z levé kamery a zároveň i na snímku z kamery pravé. Problém nalezení bodu v obrazech levé a pravé kamery je zjednodušen tím, že odpovídající si body musí ležet na epipolární linii. Ke každému bodu viditelnému jednou kamerou existuje stejný bod viditelný druhou kamerou, který leží na úsečce, která vznikne jako průmět myšlené spojnice – ohnisko kamery, bod na snímku, bod na objektu – do obrazové roviny druhé kamery (obr.4).

Na základě identifikace jednotlivých bodů oběma kamerami a za využití principu optické triangulace se spočtou prostorové souřadnice daných bodů.



Obr.4 Epipolární linie

Kompletní měření se skládá z několika dílčích měření. Pro celkové zachycení předmětu by mělo být každé z těchto individuálních měření z jiného úhlu. K automatickému spojení jednotlivých měření systém ATOS používá jedinečné referenční body, které v průběhu samotného měření sám identifikuje. Tyto referenční body bývají dvoubarevné – kontrastní, opticky dobře rozeznatelné. V našem případě se jednalo o černé čtverce uvnitř s bílým kolečkem.

Příprava skeneru

Před každým měřením je třeba dostatečně připravit skener i měřený předmět. Kalibrace skeneru závisí především na velikosti měřeného předmětu. Velikost měřeného předmětu ovlivňuje výběr kamery a projektoru. Měřicí vzdálenost mezi projektorem a měřeným objektem je též ovlivněna velikostí skenovaného objektu. Následující tabulka (tab.1) uvádí konfiguraci skeneru při měření. K vlastní kalibraci CCD kamer se používají tzv. kalibrační desky, jejichž velikost opět závisí na velikosti měřeného objektu (obr.5).

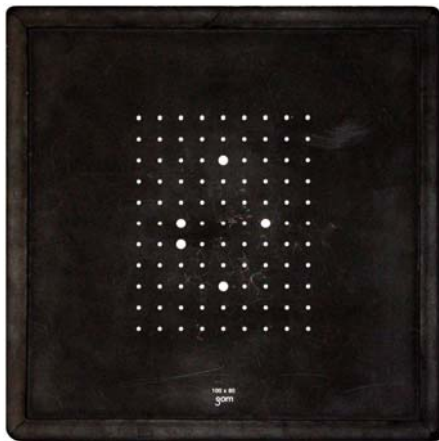
Tab.1 Konfigurace skeneru

Kalibrační panel	Označení	Kamera	Projektor	Kalibrační vzdálenost	Úhel
100 x 80	nejmenší	35 mm	17 mm	750 mm	35°

Příprava předmětu

Při přípravě skenovaného předmětu se řídíme několika hlavními aspekty. Jsou jimi zejména struktura povrchu, velikost a tvar objektu. Pokud není kontrast mezi povrchem předmětu a promítanými pruhy světla dostatečný, nedokážou CCD kamery tyto pruhy rozeznat a skenování je nemožné. V tomto případě je třeba vhodnými prostředky dočasně upravit barvu skenovaného objektu (obr.6). U novějších zařízení ATOS I, ATOS II a ATOS III však tyto úpravy nejsou v mnoha případech nutné, protože tyto skenery již detekuje několik odstínů šedé barvy.

Barva pozadí měřeného objektu by měla být tmavá a nejlépe matná, neboť takto zbarvené objekty neregenerují při skenování žádná data.



Obr.5 Kalibrační deska



Obr.6 Křídový nástřík

Strategie skenování

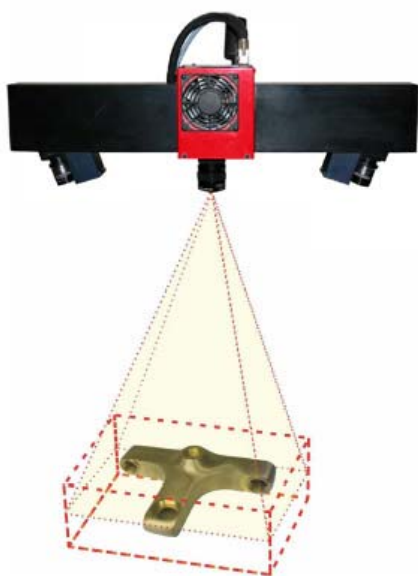
Z hlediska velikosti skenovaného objektu a nároků na přesnost skenování rozlišujeme čtyři hlavní strategie skenování. Například velmi malý objekt vyžaduje odlišný postup skenování nežli automobil v měřítku 1:1. Ve všech případech pak hrají významnou roli referenční body a jejich vhodné rozmístění.

✘ skenování malých objektů

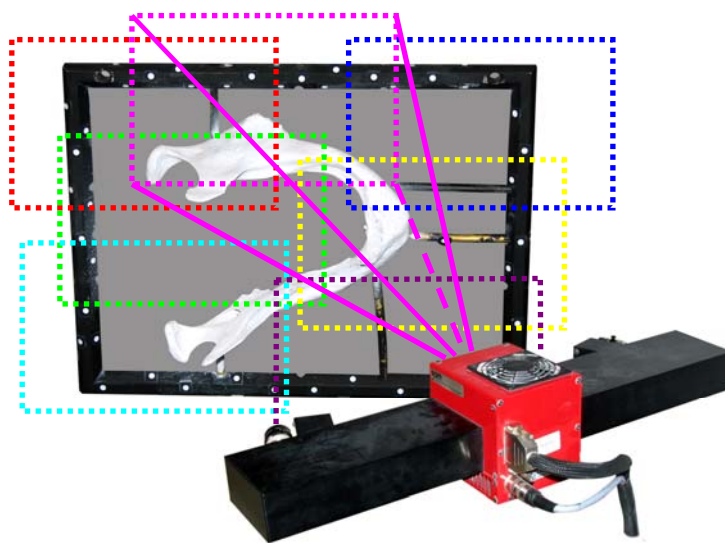
Pokud velikost měřeného objektu nepřesáhne velikost měřicího objemu systému ATOS, nebo je tato velikost měřicího objemu pouze mírně překročena, pak strategie takového skenování je poměrně jednoduchá (obr.7). Díky malému počtu individuálních měření se zvyšuje rychlost dosažení celkového výsledku měření.

✘ skenování velkých objektů bez použití fotogrammetrického systému TRITOP

V tomto případě je měřený objekt naskenován postupně po menších částech a následně jsou tato dílčí měření spojena pomocí referenčních bodů (obr.8). Ke správnému sesazení jednotlivých měření musí každé následující měření obsahovat alespoň tři referenční body z měření předcházejících. První z těchto dílčích měření určuje souřadný systém a každé následující je do tohoto souřadného systému transformováno.



Obr.7 Skenování malých předmětů



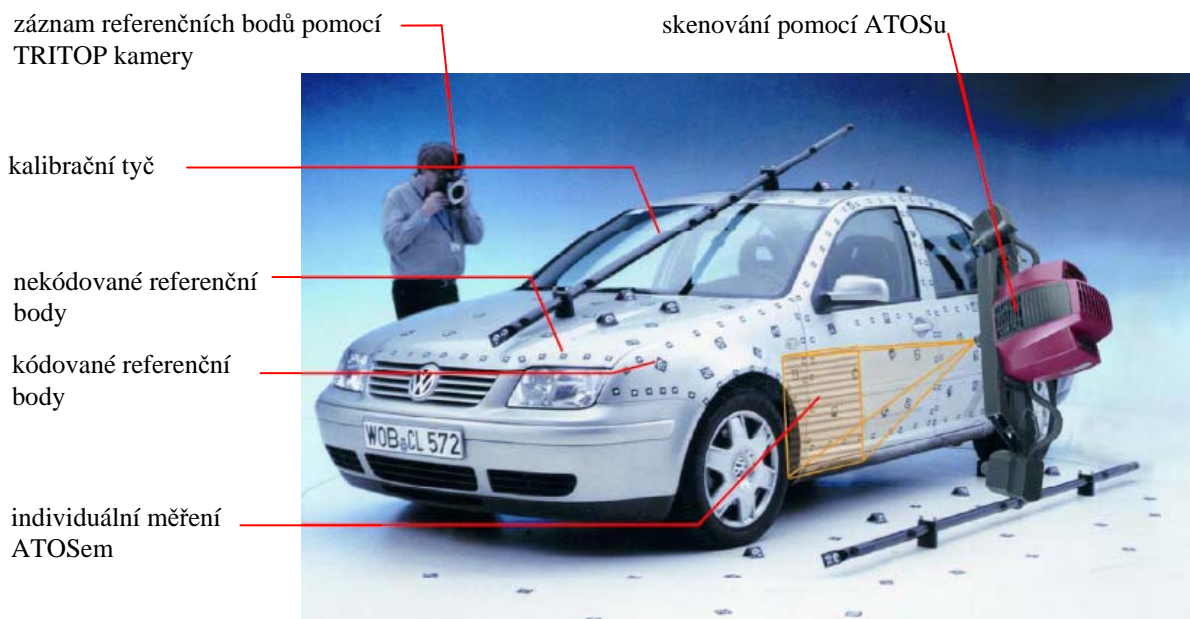
Obr.8 Skenování bez TRITOPu

✘ skenování velkých objektů s využitím fotogrammetrického systému TRITOP

Jak ukazuje obrázek 9, v prvním kroku jsou získány 3D souřadnice kódovaných a nekódovaných referenčních bodů. Kódované referenční body slouží k automatickému zjištění pozice snímací kamery. Součástí měření musí být kalibrační tyč, která umožňuje systému správně vyhodnotit vzdálenosti měřených referenčních bodů. System ATOS je následně schopen pracovat s nekódovanými referenčními body, které umožňují správné spojení dílčích měření. Jednotlivá měření jsou transformována do souřadného systému, který je definován pomocí TRITOP referenčních bodů.

✘ skenování složitých 3D objektů

Při skenování složitých 3D objektů je vhodné získat 3D souřadnice referenčních bodů pomocí fotogrammetrického systému TRITOP. Komplexní 3D struktura je pak získána pomocí individuálních měření ATOSem.



Obr.9 Skenování velkých objektů s využitím fotogrammetrického systému TRITOP

Umístění referenčních bodů

Množství a rozmístění referenčních bodů závisí především na tvaru a velikosti měřeného objektu. Pokud je skenovaný objekt větších rozměrů a jeho tvar nepatří mezi nejsložitější, můžeme umístit referenční body přímo na povrch takového tělesa (obr.10). Výhodou pak je, že s tímto tělesem můžeme během měření hýbat. Naproti tomu nám však po naskenování vzniknou po referenčních bodech na povrchu tělesa díry, které je nutné dodatečně „zalepit“.

Jestliže nám geometrie objektu nedovolí umístit dostatečné množství referenčních bodů přímo na vlastní povrch – příliš zaoblené plochy, musíme tyto body nalepit také vně měřeného předmětu (obr.11). Během měření však nesmí dojít k pohybu měřeného objektu vzhledem k referenčním bodům.



Obr.10 Referenční body přímo na objektu



Obr.11 Referenční body na i vně objektu

Dolní čelist patří mezi menší objekty, avšak pro svoji složitou geometrii, z hlediska skenování, mezi nejsložitější. K získání celkového digitálního modelu je třeba objekt snímat ze všech stran a následně jednotlivé snímky složit. Pro takovýto případ existuje k vhodnému umístění referenčních bodů tzv. referenční rámeček. Body jsou umístěny ze všech stran na obvodu rámečku. Skenovaný objekt je pak připevněn pomocí tenkých úchytů uvnitř rámečku (obr.12).



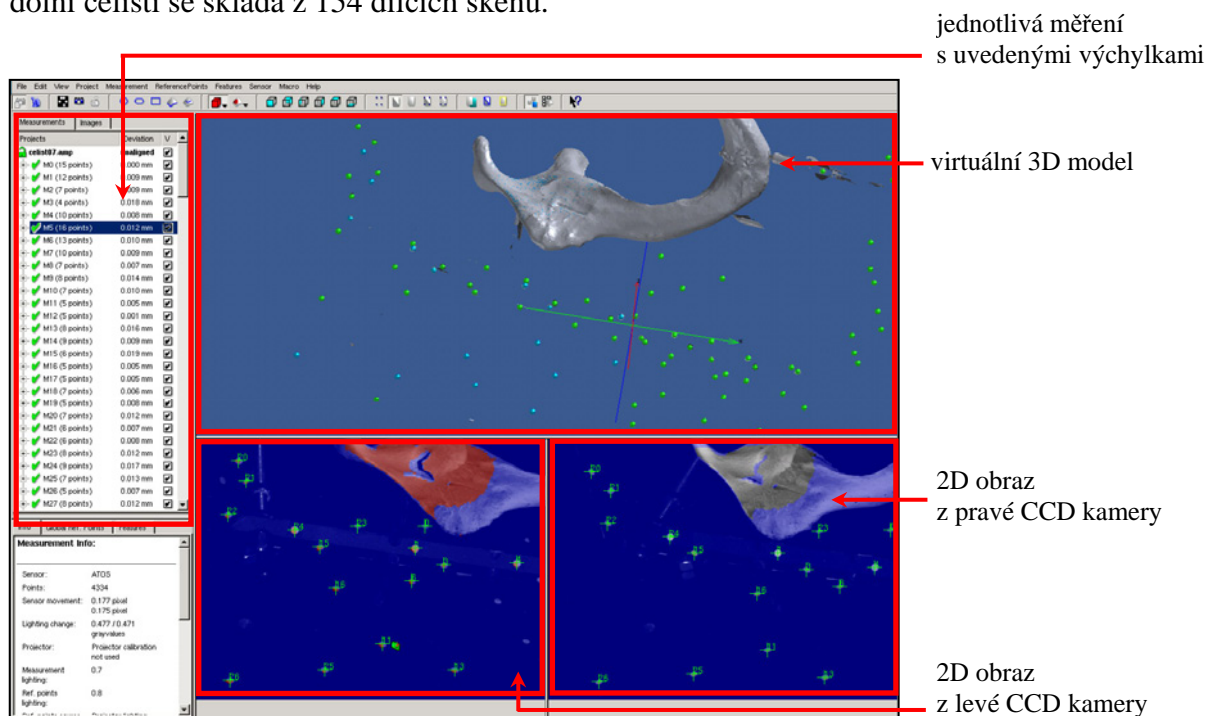
Obr.12 Referenční rámeček

Celou soustavou, referenční rámeček – skenovaný objekt, je možné otáčet a hýbat. Díky tomu pak CCD kamery mohou sledovat objekt z mnoha úhlů a tak získat přesnější model.

4. Vlastní proces měření

Po úspěšné kalibraci skeneru a přípravě měřeného objektu přichází na řadu vlastní proces měření. Software ATOS nám umožňuje neustále kontrolovat a korigovat polohu obou CCD kamer, aby bylo měření co nejefektivnější. Celkový počet snímků pak závisí na složitosti geometrie snímaného objektu.

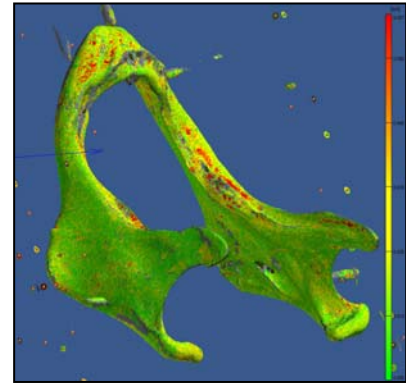
Obrázek 13 ukazuje jedno z dílčích měření. Ve spodní části jsou patrná dvě okna, ve kterých jsou vidět pohledy jednotlivých CCD kamer. V každém pohledu jsou zvýrazněny zelené křížky s čísly. Tyto představují zaměřené referenční body. Pomocí uvedených čísel můžeme v levém sloupci kontrolovat přesnost zaměření každého bodu v každém měření. Se vzrůstajícím číslem měření získává virtuální 3D model v horní části obrazovky reálnější podobu, ale zároveň vzrůstá i datová náročnost projektu. Výsledné měření dolní čelisti se skládá z 154 dílčích skenů.



Obr.13 Obrazovka dílčího měření

V důsledku pohybu měřeného objektu se mohou během měření vyskytnout drobné nepřesnosti mezi jednotlivými snímky. K redukci těchto odchylek existuje příkaz Align Project. V průběhu procesu „vyrovnání“ lze nastavit maximální velikosti rozestupů mezi dílčími měřeními, které mají být uzavřeny. Pokud je námi definovaná hodnota větší, k uzavření nedochází a systém považuje mezeru za detail objektu. Další veličinou, kterou je možno nastavit je rastr. Hodnota rastru definuje, ke kterému bodu měření by mělo být vyrovnávání ploch počítáno. Nastavení hodnoty rastru na jedničku tedy znamená, že pro výpočet jsou uvažovány všechny naměřené body. Takovýto výpočet však může být časově velmi náročný, proto je vhodné zpočátku volit hodnoty vyšší, např. 6-8.

Barevné rozdělení (obr.14) slouží jako vizuální odhad procesu „vyrovnání“ ploch. Pokud je navržený výsledek vyhovující potvrdíme jej a systém plochy automaticky vyrovná. Jestliže spokojeni nejsme, snížíme hodnotu rastru a proces vyrovnávání ploch opakujeme.

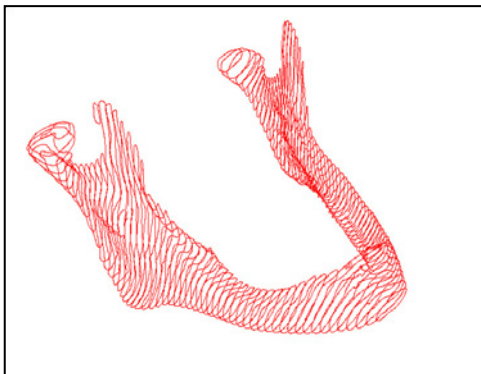


Obr.14 Align project

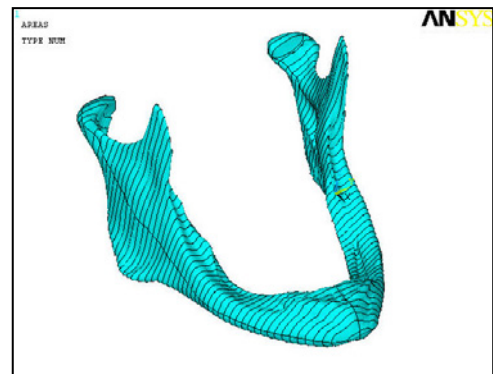
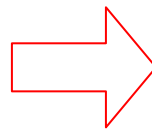
Doposud jsme však pracovali pouze s naměřenými body. Pro další práci je nutné naměřený mrak bodů polygonizovat, tzn. převést na síť trojúhelníků. Hustota této sítě je dána mírou zakřivení měřeného objektu.

Konečným výstupem měření může být optimalizovaná polygonální síť (STL formát), mrak bodů, obrysové křivky nebo jednotlivé řezy objektem (IGES formát).

Takto získané řezy ve formátu *.iges (obr.15) s rozstupem 2 mm byly importovány do Ansysu a následně z těchto křivek byly vytvořeny entity vyšší úrovně [křivky ⇒ plochy (obr.16) ⇒ objemy].



Obr.15 Řezy výsledným modelem



Obr.16 3D model geometrie dolní čelisti v programu Ansys - plochy

Typy optického skeneru ATOS

Jak je uvedeno v tabulce 3, německá firma GOM dodává na trh tři typy skeneru ATOS, které se vzájemně liší především velikostí měřeného objemu na jeden záběr a rozlišením CCD kamer. Pro skenování malých objektů (SO - small object) lze jednotlivé typy skenerů dále konfigurovat. Pro naše měření byl použit starší model ATOS Standart.

Tab.2 3D skenery ATOS

Typ (varianta) skeneru	Měřicí objem [mm ³]	Naměřené body	Vzdálenost mezi body [mm]
ATOS Standart	135x108x108 - 350x280x280	440 000 bodů / 8s	0,1 - 0,5
ATOS I	125x100x90 - 1000x800x800	800 000 bodů / 1s	0,12 - 1,0
ATOS I SO	65x50x30 - 250x200x200	800 000 bodů / 1s	0,06 - 0,25
ATOS II	135x108x108 - 1700x1360x1360	1 300 000 bodů / 7s	0,08 - 1,0
ATOS II SO	35x28x20 - 200x160x150	1 300 000 bodů / 7s	0,03 - 0,15
ATOS III	150x150x100 - 2000x2000x2000	4 000 000 bodů / 8s	0,075 - 1,0
ATOS SO 4M	35x35x15 - 300x300x300	4 000 000 bodů / 8s	0,018 - 0,15

5. Rapid Prototyping

Pro názorné sdělení designérských nebo konstrukčních nápadů je třírozměrný reálný model prakticky nenahraditelný. Různé metody Rapid Prototypingu slouží k rychlé tvorbě prototypů a modelů. Během několika minut či hodin je možné vyrobit model, který by například obráběním trval několik dnů, možná i týdnů. Pomocí metod Rapid Prototypingu je velmi snadné vytvářet další modifikace prototypového modelu a předejít tak pozdějším změnám v procesu výroby, které by jistě vedly ke zvýšení nákladů.

3D tiskárny Dimension (obr.17) americké firmy Stratasys využívají pro stavbu modelu technologii FDM (Fused Deposition Modeling) - postupné nanášení taveniny po velmi tenkých vrstvách. Tisková hlava, jejíž teplota při tisku dosahuje až 270°C se pohybuje v rovině XY (obr.18). Pohyb ve směru osy Z je zajištěn posuvem samotného tisknutého předmětu. Před vlastním tiskem je možné zvolit tloušťku vrstvy 0,254 mm nebo 0,33 mm.

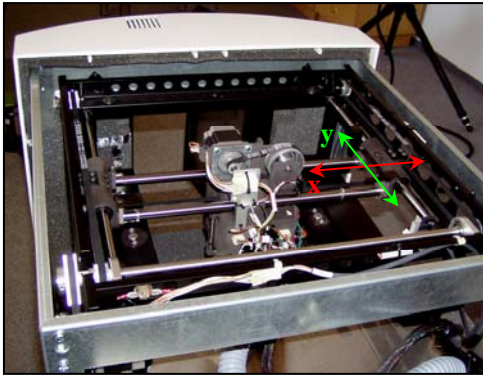
Modelovací materiál pro výrobu předmětů je plast ABS (acrylonitril-butadien-styren). Při výrobě tvarově složitých modelů je nutné používat tzv. podpory, které zabraňují „zhroutilí“ modelů v průběhu tisku (obr.19) Materiál použitých podpor je závislý na daném typu tiskárny. Firma Stratasys dodává na trh dva hlavní typy této 3D tiskárny.

Tiskárna Dimension SST (Soluble Support Technology) umožňuje tisk složitějších modelů velmi komplikovaných tvarů s dutinami a velmi tenkými stěnami. Je to způsobeno používaným typem materiálu pro tisk podpor, který je rozpustný a lehce vymyvatelný.

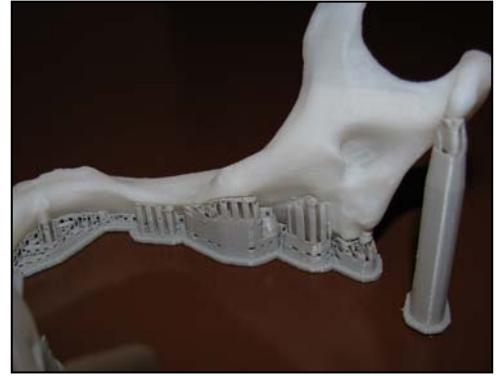
Druhým, levnějším typem je tiskárna Dimension BST (Breakaway Support Technology). Na rozdíl od tiskárny SST je nutné podpory po vytištění odstranit manuálně, proto při tisku jemnějších detailů vzniká při odstraňování těchto podpor nebezpečí poškození vlastního modelu.



Obr.17 3D tiskárna Dimension

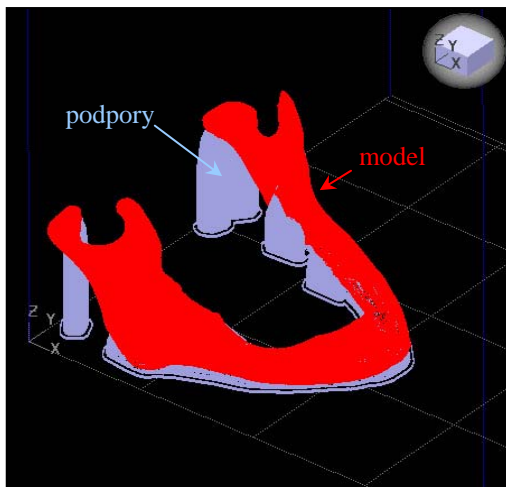


Obr.18 Pohyb tiskové hlavy

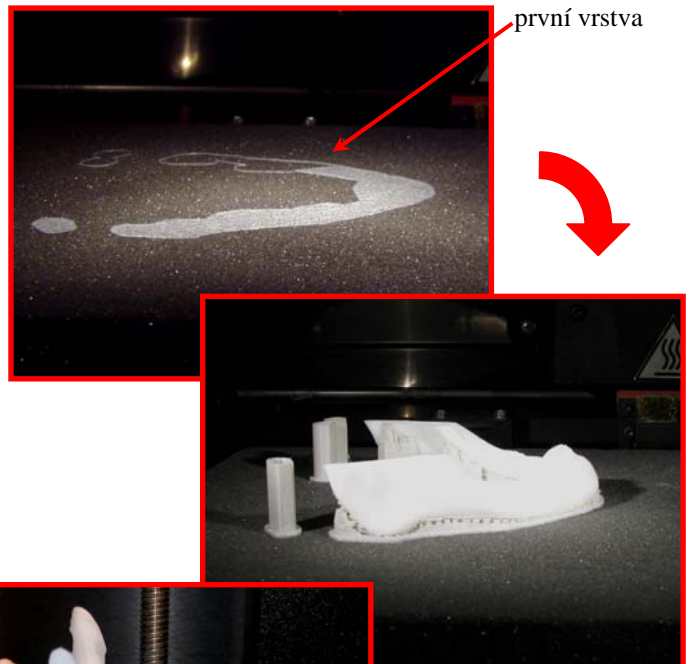


Obr.19 Podpory

Vytvořený nebo v našem případě naskenovaný model je ve formátu STL načten do programu Catalyst, kde je orientován do vhodné polohy pro tisk. Pomocí softwaru jsou automaticky vygenerovány jednotlivé stavební vrstvy a pokud je to nutné, Catalyst doplní potřebné podpory pro výrobu (obr.20). Maximální rozměry modelu, který je možný tisknout najednou jsou 203 x 203 x 305 mm. Vlastní průběh tisku dolní čelisti je zachycen na obrázku 21.



Obr.20 Software Catalyst



Obr.21 Průběh tisku



výsledný 3D model



Obr.22 Plastový 3D model dolní čelisti s podporami



Obr.23 Model dolní čelisti

6. Závěr

Dolní čelist byla naskenovaná pomocí optického skeneru ATOS Standart. Díky svému tvaru musel být objekt upevněn do kalibračního rámečku, na který byly nalepeny referenční body. Tyto referenční body umožnily sestavit 154 dílčích měření ve výsledný virtuální 3D model.

Pro tvorbu kvalitních digitálních 3D modelů nejen kovových implantátů se použití optického skeneru ukázalo být účelné. Takto získaná data ve formátu STL nebo IGES je možné pro další práci importovat do systémů CAD,CAM a FEM.

Díky datům získaným pomocí skeneru ATOS byla čelist vytištěna na tiskárně Dimension BST. K dosažení kvalitnějšího výsledku byla zvolena tloušťka vrstvy tisku 0,254 mm. Na celý model dolní čelisti bylo spotřebováno 24,53 cm³ plastu ABS a 8,54 cm³ podpory. Doba tisku tohoto modelu byla cca 6 hodin.

7. Poděkování

Uvedená práce byla podporována grantem GAČR 101/05/0136.

Za odborné připomínky v oblastech 3D digitalizace a rychlé výroby prototypů směřují díky firmě MCAE Systems, s.r.o., která je distributorem 3D skenerů a tiskáren v ČR.

8. Literatura

Haußecker,H., Geißler,P.,1999, *Handbook of Computer Vision and Applications: Volume 1, Sensors and Imaging*, San Diego, Kalifornia

Hlaváč,V., Šonka,M., 1992, *Počítačové vidění 1. vydání*, Grada, Praha, Česká Republika

<http://www.mcae.cz> , Brno, Česká Republika