

Priemyselná tomografia. Nový rozmer v metrológii.

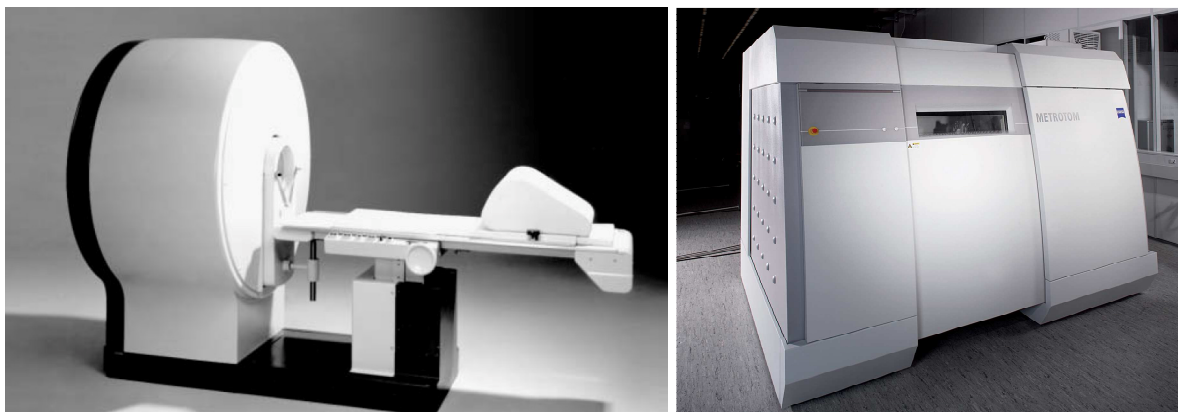
Peter Kaťuch, Jozef Živčák

História počítačovej tomografie

Objavom röntgenového žiarenia koncom 19. storočia sa tieto lúče začali využívať hlavne na diagnostiku a kontrolu ľudskému oku nedostupných miest. Významnou vlastnosťou tohto žiarenia je práve prechod tuhými látkami. V závislosti na absorpčných vlastnostiach látky a kumulovanej hrúbke cez ktorú lúče X prenikajú sa znižuje intenzita žiarenia vychádzajúceho za skúmaným telesom. Takýmto spôsobom je možné diagnostikovať napríklad chyby v materiáloch, kontrolovať vnútorné orgány ľudského tela prípadne kontrolovať obsah batožiny na letiskách.

Až zdokonalenie výpočtovej techniky v sedemdesiatych rokoch minulého storočia umožnilo začať využívať röntgenové žiarenie pre trojrozmernú diagnostiku. Vďaka počítačovej tomografii (CT) bolo možné vytvárať virtuálne rezy objemovým modelom snímaného telesa bez jeho reálnej deštrukcie. Počítačová tomografia si našla najprv využitie najmä v oblasti medicíny (obr. 1). V priebehu niekoľkých rokov sa začala hojne využívať a tým bol urýchlený aj proces jej zdokonaľovania. Vývojom sa postupne zvyšuje obrazová kvalita a rozlíšenie, znižuje radiačná záťaž a skracuje rýchlosť vyšetrenia.

V posledných rokoch sa počítačová tomografia prebojovala aj do oblasti priemyselnej. Priemyselné CT prístroje sú koncipované odlišne než medicínske tomografy. Nakoľko snímané súčiastky majú poväčšine tuhú štruktúru, nie je nutné, aby boli v statickej polohe (kedy rotuje detektor a rentgenka) a tiež nie je potrebné tak výrazne obmedzovať radiačné zaťaženie.



Obr. 1 Prvý komerčný počítačový tomograf Siretom firmy Siemens z roku 1974 a Metrotom 1500 firmy Carl Zeiss ako reprezentant najnovších počítačových tomografov určených pre priemysel

Princíp priemyselných CT

Priemyselné tomografy ponúkané na trhu majú poväčšine podobnú konštrukciu. Medzi zdrojom rtg žiarenia a detektorom, ktorý premieňa žiarenie na elektrický signál (čiže na informáciu), rotuje meraná súčiastka okolo zvislej osi. Počas jej rotácie sa v jednotlivých krokoch snímajú rtg obrázky, tzv. röntgenogramy. Z týchto obrazov (často niekoľko stoviek) vytvorí rekonštrukčný softvér trojrozmerný model reálnej súčiastky vo forme mračna bodov. Tieto body nazývané voxely (odvodené od pojmu priestorový bod - volume pixel) sú v priestore usporiadané body, ktorým je priradená napr. 16-bitová informácia o absorpčnej

vlastnosti reálnej súčiastky v tejto pozícii. Vo virtuálnom prostredí sa táto informácia zobrazuje ako určitý stupeň šedej farby. V súčasnej dobe konštrukcie priemyselných tomografov, kedy sa rozlíšenie detektora pohybuje okolo 1024x1024 pixelov, predstavuje dátový súbor s informáciou o snímanom priestore cca 2GB dát. Pri tomografoch s detektormi s rozlíšením 2048x2048 pixelov je objem dát už takmer 16GB.

Dnešné priemyselné tomografy sú navrhované pre snímanie s vysokou presnosťou. Vďaka tomu sa ich využitie rozšírilo z diagnostickej oblasti až do oblasti metrológie, kde ponúkajú pridanú hodnotu vo forme presných meracích prístrojov na kontrolu tvarovo veľmi komplikovaných súčiastok, ktoré doteraz nebolo možné merať inou technológiou. Ide väčšinou o súčiastky s oblasťami nedostupnými pre konvenčnú meraciu techniku. Firma Carl Zeiss ako jeden z výrobcov priemyselných tomografov nazvala túto technológiu Metrotomografia, čo je spojenie termínov metrológia a tomografia. Medzi hlavné oblasti využitia metrotomografie patria:

- testovanie:
 - kvalita spojov v zostavách
 - analýza pórovitosti
 - analýza porúch a defektov
 - inšpekcia materiálu
- meranie rozmerov vonkajších i vnútorných prvkov
- spätné inžinierstvo (získanie CAD modelu z reálnej súčiastky)
- porovnávanie celkovej geometrie menovitej s reálnou (zosnímanou)

Vďaka týmto vlastnostiam sa využitie priemyselnej tomografie rozšírilo do oblastí strojárstva, automobilového priemyslu, elektroniky, potravinárskeho priemyslu a mnohých iných oblastí.

Predstaviteľom týchto priemyselných tomografov je Metrotom 1500 firmy Carl Zeiss. Tento prístroj je inštalovaný aj v Technologickom centre počítačovej tomografie na Technickej univerzite v Košiciach na Slovensku (obr. 2).



Obr. 2 Metrotom 1500 v Technologickom centre počítačovej tomografie na TU v Košiciach.
V pozadí obežného kola vidieť plošný detektor a vedľa karburátora je zdroj rtg žiarenia

Využitie metrotomografie

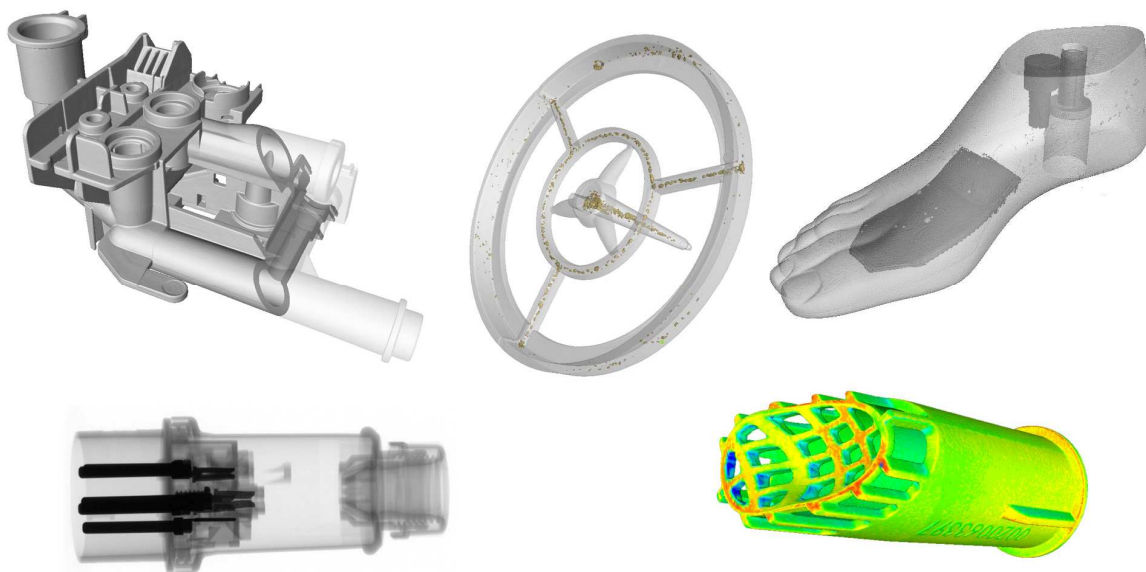
Oproti konvenčným metódam merania rozmerov súčiastok prináša tomografia množstvo možností, ktoré doposiaľ pri kontrole kvality chýbali. Značnou výhodou je získanie informácie o neprístupných oblastiach pre konvenčnú 3D súradnicovú meraciu techniku či už dotykovú,

kamerovú alebo laserovú. Dnes vyskytujúce sa tvarovo veľmi zložité diely vyrábané vstrekom alebo odlieváním do viacdielných foriem často nie je možné kontrolovať inou metódou. Röntgenovým snímaním dostávame virtuálny model, ktorý môžeme ľubovoľne natáčať, preskúmať v rezoch alebo podrobiť ďalším analýzám.

Práve získanie informácie o celom objeme súčiastky prináša tieto výhody. Žiadanou a nenahraditeľnou možnosťou metrotomografie je kontrola pórovitosti materiálov, prípadne výskytu cudzích materiálov vo vnútri objektu bez deštrukcie reálnej súčiastky. Dnes sme schopní určiť vysoko presnú hodnotu pórovitosti materiálu, určiť umiestnenie, tvar a veľkosť každej bubliny, ktorá sa pri procese výroby dostala do materiálu.

Ďalšou výhodou je kontrola zostavených dielov. V priebehu montáže občas nastáva problém, kedy samostatné diely rozmerovo vyhovujú, avšak zmontovaný celok buď nefunguje, vykonáva nežiaduce funkcie (často je to neprimeraný hluk, vibrácie, deformácie) alebo funguje len krátkodobo. Pri rozobratí zostavy by sa tento stav mohol eliminovať alebo by mohlo dôjsť k poruche, ktorá by poškodila niektoré komponenty. Takéto zostavy dielov môžu byť nasnímané pomocou tomografu. Pri dieloch, vyrobených z materiálov s rozdielnou hustotou ako napríklad kov a plast, je možné určiť, aby plastová časť, ktorej prislúchajú body s určitým stupňom šedej farby nebola zobrazená. Takýmto stransparentnením časti modelu (väčšinou povrchových krytov) je možné prezrieť zostavu bez tejto prekážky.

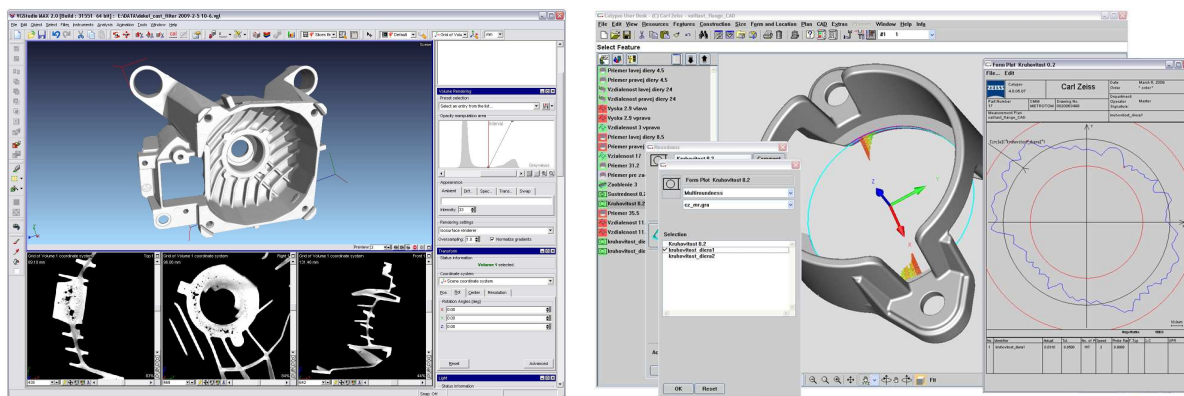
Populárnym softvérom pre prácu s mračnom bodov u viacerých výrobcov počítačových tomografov je program VG Studio Max (obr. 4).



Obr. 3 Možnosti metrotomografie: diagnóza z röntgenogramov, virtuálna separácia materiálov, nedeštrukčné prerezávanie objektom, analýza pórovitosti, tvarová analýza pri porovnaní s CAD dátami

Rozmerová analýza

Každý z výrobcov priemyselných tomografov na trhu (napr. Carl Zeiss, Werth, Wenzel, Phoenix, NorthStarImaging, atď.) uprednostňuje iný softvér pre vyhodnocovanie rozmerov. Firma Carl Zeiss využíva pre všetky svoje súradnicové meracie stroje (CMM) vlastný softvér Calypso (obr. 4). Aj Metrotom 1500 a mladší a menší Metrotom 800 sú ponúkané so softvérom Calypso a rozširujúcou opciou pre prácu s mračnom bodov.

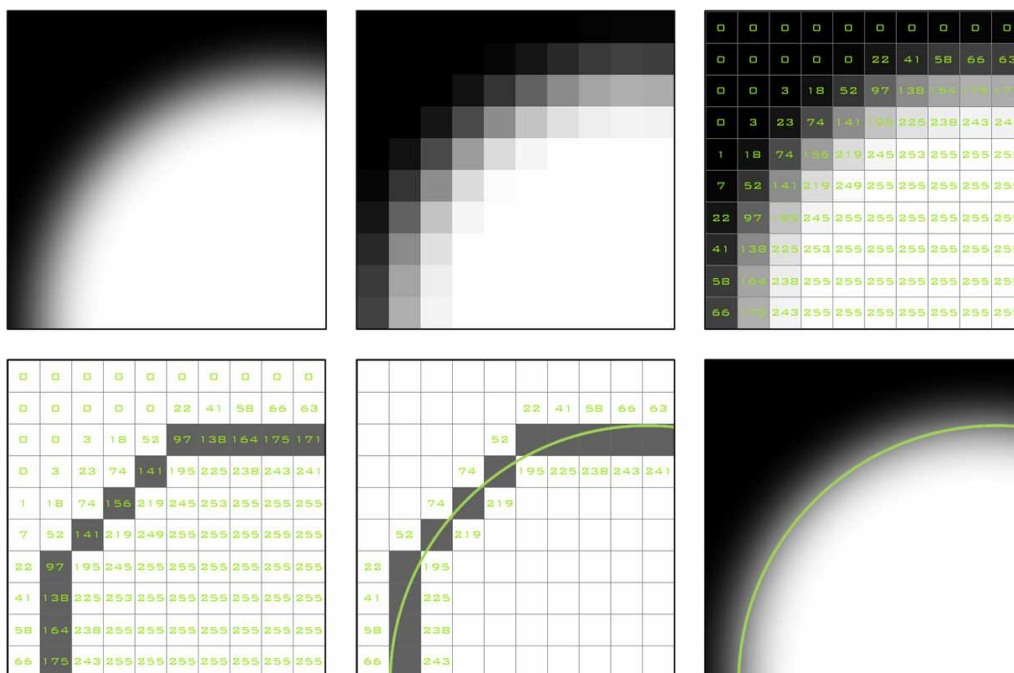


Obr. 4 Prostredie programu VG Studio Max 2.0 a prostredie programu Calypso 4.8

V závislosti od veľkosti meranej súčiastky, priepustnosti rtg žiarenia snímaným materiálom a účelu dát sa pred samotným snímaním nastavujú jeho parametre. Výkon žiariča sa v prípade Metrotomu 1500 nastavuje voľbou hodnoty napätia až do hodnoty 225 kV a prúdu v rozmedzí 0 až 1 mA. Maximálny výkon žiariča je teda 225 W. Ďalšími parametrami, ktoré ovplyvnia snímaný obraz sú citlivosť detektora a expozičná doba, počas ktorej sa jednotlivé snímky zaznamenávajú. Všetky tieto parametre musia byť nastavené tak, aby bol obraz správne exponovaný a nestrácali sa detaily obrazu prílišným alebo nedostatočným prežiarením. Súčiastku je nutné polohovať tak, aby počas rotácie okolo zvislej osi bol jej obraz stále v zornom poli detektora a to tak, aby zaberal čo najväčšiu plochu. Pred spustením merania sa nastavuje aj počet polôh na otáčku, tj. počet obrazov, ktoré sa uložia pre rekonštrukciu.

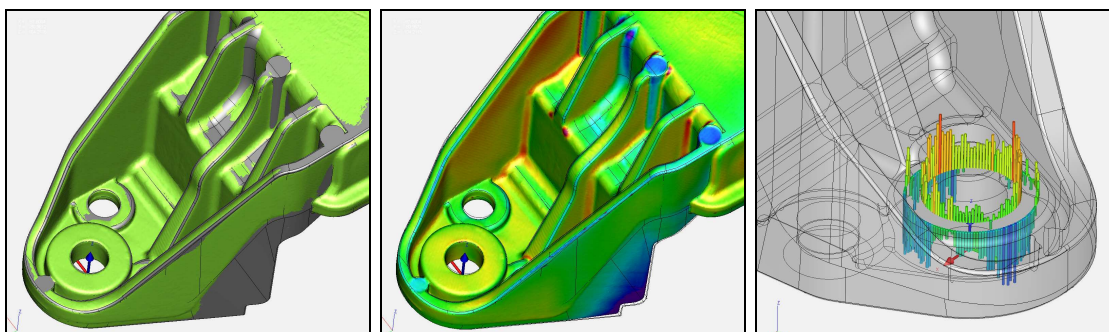
Týmito nastaveniami sa priamo ovplyvňuje veľkosť voxelu, čiže rozlíšenia, ktoré bude mať výsledné mračno bodov. Čím je bližšie súčiastka pri zdroji žiarenia (teda ďalej od detektora), tým väčší obraz súčiastky sa premietne na detektore a tým aj menší reálny rozmer má jeden voxel. Pri malých súčiastkach je možné získať rozlíšenie aj pod 10 μm .

V prostredí Calypsa je mračno bodov po importe ďalej spracované pre získanie vyššieho rozlíšenia a tým aj presnosti merania. Proces zvyšovania rozlíšenia v tomografii sa nazýva subvoxelizácia. Ide o rovnaký princíp, ktorý sa využíva pri kamerových senzorochoch na zvýšenie rozlíšenia plošných obrazcov nazvaný subpixelizácia. Subpixelizácia (obr. 5) umožňuje rozdeliť pixel, ktorý nesie väčšinou 8 alebo 16 bitovú informáciu reprezentovanú stupňom šedej farby, na menšie diely v závislosti na hodnote, ktorú nesie a tiež na hodnotách susedných pixelov. Rastrovaný obraz bez tzv. „image processingu“ dokáže len veľmi hrubo identifikovať hrany nastavením hodnoty prechodovej hranice (tzv. threshold). Subpixelizáciou sa vypočíta poloha hrany objektu v rámci jednotlivých pixelov a vhodnou metódou tvorby stredného prvku, napr. gaussovou metódou sa interpoluje tvar hrany. Obdobne sa vyhodnocuje aj poloha hrany alebo plochy objektu v priestore využitím subvoxelizácie. Pri určitých podmienkach je možné delením voxelov na menšie časti získať až 10 násobne jemnejšie rozlíšenie.



Obr. 5 Princíp subpixelizácie

Nakoľko je počítačová tomografia novou technológiou v oblasti metrologie, neexistujú zatiaľ ucelené objektívne normy (štandardy) pre stanovenie neistoty merania. Firma Carl Zeiss vyvinula pre overovanie svojich tomografov referenčný normál pozostávajúci z 27 rubínových guľôčok osadených na karbónových tyčkách. Pre jednotlivé páry guľôčok sú merané vzdialenosti ich stredov, a tým sa overujú rozdielne dĺžkové rozmery v rôznych smeroch. Meranie sa prevedie 50 krát. Ani jedna z odchýlok meraných dĺžok nesmie prekročiť hodnotu $(5 + L/50) \mu\text{m}$. Na overenie je samozrejme možné použiť aj iné prevedenia referenčných normálov. Pre Metrotom 1500 v jeho rozsahu merania je výrobcom uvádzaná maximálna dovolená chyba pri meraní $\text{MPE}_E = (9 + L/50) \mu\text{m}$.



Obr. 6 a) vyrovnanie CAD modelu s mračnom bodov b) farebná mapa odchýlok pri porovnaní CAD modelu s mračnom bodov c) zobrazenie odchýlok pre meranú charakteristiku (rovinnosť)

Digitalizáciou meraného objektu tomografiou získavame „každý“ bod povrchu aj vnútra súčiastky. Ak sa po vyhodnotení zadaných rozmerov zákazníka rozhodne, že potrebuje na súčiastke stanoviť hodnoty ďalších charakteristík, nie je potrebné skenovať súčiastku znova, len sa stanoví stratégia merania na novom elemente a tým sa vyhodnotia body z mračna bodov, ktoré tomuto elementu prislúchajú.

Najväčšiu výhodu pri meraní má táto technológia v rýchlosti identifikovania tvarovo problematických oblastí na súčiastke. Po získaní mračna bodov je možné v prostredí Caplypsa

stotožniť získané mračno s CAD modelom, ktorý má ideálny menovitý tvar predpísaný konštruktérom (obr. 6 a). Po stotožnení sa vykreslia odchýlky bodov reálneho objektu od nominálneho objektu vo forme tzv. farebnej mapy (obr. 6 b). Na rozdiel od dotykových metód súradnicových meracích strojov, kedy je potrebné pre zistenie komplexného tvaru a nájdenie problematických miest vytvoriť zložitý merací program, je metóda porovnania CAD modelu s mračnom bodov prínosom pre zrýchlenie kontroly napríklad pri zavádzaní výrobného procesu.

Program Calypso umožňuje vyhodnocovať dáta z Metrotomu rovnako ako dáta získané pri meraní na konvenčných súradnicových meracích strojoch. Pre meranie vybraných elementov sa tým istým spôsobom definujú stratégie merania, volia spôsoby filtrovania či metódy vyhodnotenia charakteristík. Spustením meracieho procesu sa podľa definovaných stratégií merania vykoná virtuálne meranie na mračne bodov. Výsledky vo forme výstupného protokolu sú plnohodnotným výstupom z merania.

Záver

Metrotomografia je nová technológia, ktorá zatiaľ nie je zavedená v praxi tak výrazne ako konvenčná súradnicová meracia technika. Ponúkané výhody sú však nesporným prínosom v oblasti metrológie a kontroly kvality a preto si postupne získava čestné miesto medzi meracími zariadeniami. Momentálne je Metrotom 1500 na Technickej univerzite v Košiciach jediným strojom svojho druhu na Slovensku aj Čechách a jeho možnosti využívajú firmy nie len zo Slovenska a Čiech, ale aj z Maďarska, Slovinska, Srbska a Poľska.

Tento príspevok bol vypracovaný za podpory Grantovej agentúry MŠ SR pri riešení projektu VEGA 1/0022/10 "Príspevok k výskumu stratégií merania na súradnicových meracích strojoch".