

Rentgenové zobrazování plastik a obrazů

Daniel Vavřík, Jan Žemlička

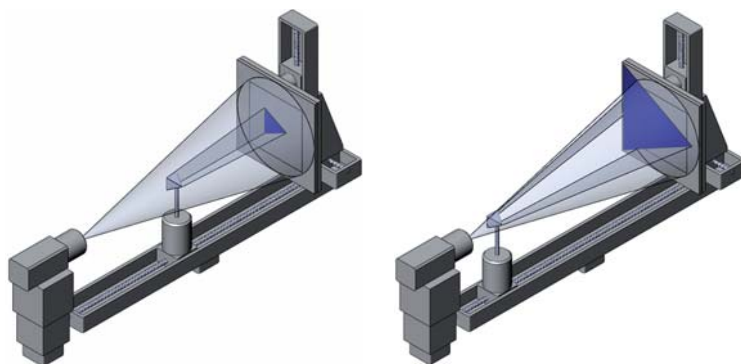
V muzejních a galerijních sbírkách se nachází mnoho cenných předmětů, u kterých nelze využít jiných průzkumných metod než neinvazivních. Mezi tyto metody náleží i rentgenové zobrazování, které může poskytnout cenné informace o vnitřní struktuře zkoumaného díla. K takovému průzkumu je řada důvodů. Znalosti vnitřní struktury uměleckého objektu napomáhají restaurátorům při identifikaci dřívějších úprav, oprav a doplňků a lze s jejich pomocí identifikovat skryté vnitřní vady a poškození; z hlediska umělecko-historického je přínosné shromáždit informace o užitých technologických postupech – lze tak v některých případech získat dílensky či autorsky specifická data – jakýsi „podpis“ autora; u obzvláště cenných artefaktů je vhodné nedestruktivní zobrazovací metodou dokumentovat jejich stav v případě jejich přesunu do jiné lokace (například v případě dlouhodobé zápůjčky).

Jednou ze základních metod zkoumání vnitřní struktury objektů je rentgenografie, založená na prozařování objektu rentgenkou, kdy je snímek reprezentující útlum rentgenového (RTG) záření po průchodu objektem zaznamenáván zobrazovacím detektorem, umístěným za objektem. Vzniklý dvourozměrný rentgenogram zahrnuje informace o vnitřní struktuře, hustotě a atomovém složení zkoumaného objektu.

Rentgenogram sejmутý z jednoho pozorovacího úhlu nám samozřejmě nepoví, jak jsou vnitřní detaily objektu rozloženy v objemu, do rentgenogramu se promítne vše, čím RTG záření prošlo. Prostorovou strukturu objektu se můžeme dozvědět až pomocí počítačové tomografie.

V případě obrazů nám rentgenografie dává obvykle všechny potřebné informace. Je ale třeba mít k dispozici manipulační systém, který dovolí zobrazit i relativně velká plátana. Další podmínkou je zobrazovací detektor s vysokým rozlišením a citlivostí i na nízké energie RTG fotonů.

Rentgenografické i tomografické metody v posledních dvou dekadách zaznamenaly významný technologický pokrok, který umožnily především nové nano- a mikrofokusové rentgenky a digitální zobrazovací detektory. Rentgenografický/tomografický skener laboratoře rentgenové radiografie a tomografie Centra excelence Telč (CET) je osazen takovými prvky. Navíc disponuje pokročilým manipulačním systémem s přesným absolutním odměřováním poloh. Díky tomu můžeme běžně zobrazovat vnitřní struktury materiálu s mikrometrickým rozlišením a skenovat rozměrná plátana až do velikosti jednoho čtverečního metru.



OBRAZEK 251: Schematické znázornění geometrického zvětšení v rentgenografickém/tomografickém skeneru: vlevo je objekt připevněný na rotačním stolku v půlce vzdálenosti „rentgenka – detektor“, výsledné zvětšení 2 \times . Vpravo je v jedné šestině vzdálenosti, blíže k rentgence, výsledné zvětšení 6 \times , projekce je větší než aktivní plocha detektoru (pro použitou velikost objektu).

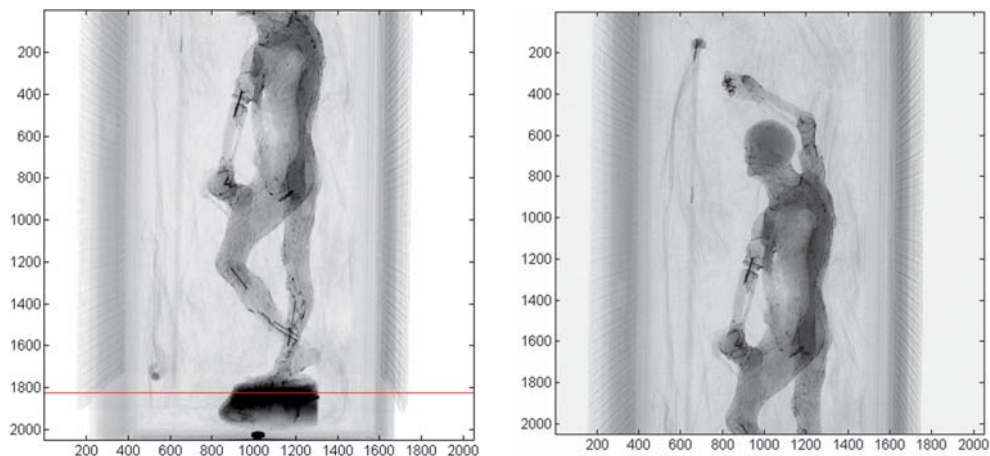
Rentgenografie

Do dvourozměrného rentgenogramu jsou projektovány všechny struktury, které se ocitly v cestě mezi zdrojem RTG záření, v našem případě rentgenkou, a zobrazovacím detektorem. Nevíme tedy, v jaké hloubce objektu se pozorovaný prvek vyskytuje. Přesto tak v mnoha případech můžeme získat dostatečné informace o vnitřní struktuře zkoumaného objektu. Základním předpokladem úspěšné rentgenografie je dostatečný odstup signálu od šumu, tj. získání dostatečně kontrastního snímku. Schopnost RTG záření prosvítit studovaný objekt je přímo úměrná energii RTG fotonů. V případě rentgenky je RTG spektrum spojité, s maximem rovným urychlovacímu napětí. Pro masivní objekty či objekty složené z těžších prvků se pak volí napětí až stovky kV, jinak za objektem naměříme příliš malý, či dokonce žádný užitečný signál. Naopak pro málo tlumící objekty je nutné použít napětí na úrovni desítek kV, energetická část spektra se při pronikání objektem utlumí velmi málo, či vůbec – opět se tak snižuje úroveň užitečného signálu.

Rozlišení rentgenogramu je prvotně dáno geometrickým zvětšením, nepřímo úměrným poměru vzdáleností „rentgenka – detektor“ ku „rentgenka – objekt“, schematické vyobrazení geometrického zvětšení rentgenografickým/tomografickým skenerem je na **obrázku 251**.

Maximální možné rozlišení rentgenogramů je omezené velikostí emisní skvrny rentgenky (plocha, ze které jsou emitovány RTG fotony) – v rentgenogramech lze rozpoznat detaily, které jsou větší než polovina velikosti skvrny. Na straně detektoru je důležitá vysoká granularita (malá zrnitost filmu či velikost pixelu detektoru), vysoký dynamický rozsah (i malá změna v útlumu je rozpoznatelná) a především malé „rozmazání“ kontrastní hrany (signál by měl přejít z maxima do minima na co nejkratší vzdálenosti).

Využití RTG optiky je v praxi velmi omezené, proto je maximální průřez objektu, který lze zobrazit v jednom rentgenogramu, limitován velikostí detektoru a použitým zvětšením. Například pro detektor s aktivní plochou 400 \times 400 mm můžeme při stonásobném zvětšení v jednom rentgenogramu zobrazit objekt o maximálním průřezu 4 mm. V případě, kdy je projekce větší, než je aktivní plocha detektoru, můžeme tento objekt skenovat, tedy posunovat detektor a rentgenku kolmo k ose svazku RTG záření.

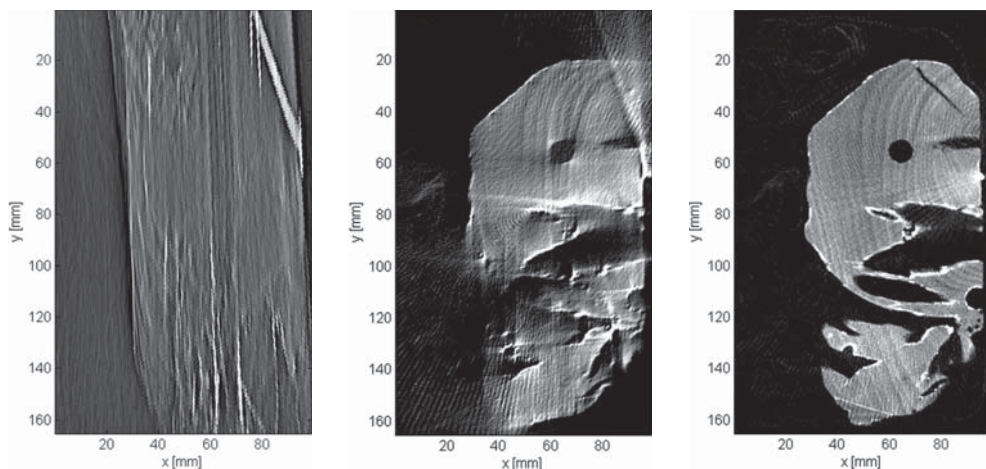


OBRÁZEK 252: Ukázka rentgenografie, zobrazena dřevěná socha Smrtka (Vanitas). Ve snímku lze jasně rozpoznat drátky, které spojují jednotlivé díly sošky (loket, koleno, bérce). Spojovací drátky v kloubech byly aplikovány při vzniku díla, drátky v bércích nejspíš pochází z pozdějších restaurátorských zásahů. Na sošce je množství tmavých teček – materiál s vysokým útlumem. Jedná se nejspíše o fragmenty polychromie, z rentgenogramu není přímo patrné, zda jsou tyto částičky na povrchu sošky. Na pozadí přepravního obalu jsou v rentgenografii obtížně rozpoznatelné dřevěná kosa a červ, které byly v krabici umístěny odděleně.

Ukázka rentgenografie je uveden na **obrázku 252**, kde je zobrazena dřevorezba kabinetního formátu zobrazující Smrtku (Vanitas) ze sbírek Národní galerie v Praze (střední Evropa, kolem 1530, lipové a břekové dřevo, v. 42 cm, fragmenty polychromie, NG v Praze inv. č. P 7338). Pro záznam obrazových dat byl použit velkoplošný detektor typu flat panel s aktivní plochou 400 × 400 mm. Na rentgence bylo nastaveno urychlovací napětí 160 kV. Toto relativně vysoké napětí bylo voleno s ohledem na přítomnost kovových spojovacích prvků a polychromie obsahující materiály s vysokým atomovým číslem (fragmenty stříbrnění, olovnatá běloba, železité pigmenty). Při měření bylo zvoleno minimální možné zvětšení 1,2×, které dovozoval rozměr ochranného boxu (během měření nebyla soška vybalována). Přesto se soška do jedné projekce nevešla celá, byla proto zobrazena na dvakrát – horní a dolní polovina. V rentgenogramech je maximální signál v místech otevřeného svazku, kde záření nestojí nic v cestě. Minimální signál je v místech spojovacích drátků (vysoká hustota) a v hmotě podstaty sochy (masivní část, záření prochází velkou tloušťkou).

Počítačová tomografie

Počítačová tomografie (computed tomography – CT) je všeobecně známá z lékařského prostředí. Medicínské CT skenery mají fixní ozařovací geometrii s přibližně dvojnásobným zvětšením, kde rotuje soustava „rentgenka – detektor“, člověk je posouván v ose rotace. Typické rozlišení medicínských CT skenerů je 1 mm, nejnovější generace dosahuje rozlišení 0,3 mm. U medicínských CT skenerů je obvykle napětí nastavitelné v rozmezí 80–120 kV. Technické tomografy jsou koncipovány jinak. Především rotuje objekt a ostatní části skeneru jsou při měření statické (viz schematický **obrázek 251**). Geometrie ozařování je nastavitelná v širokém rozmezí zvětšení, taktéž napětí na rentgence je možné měnit ve značném rozsahu.



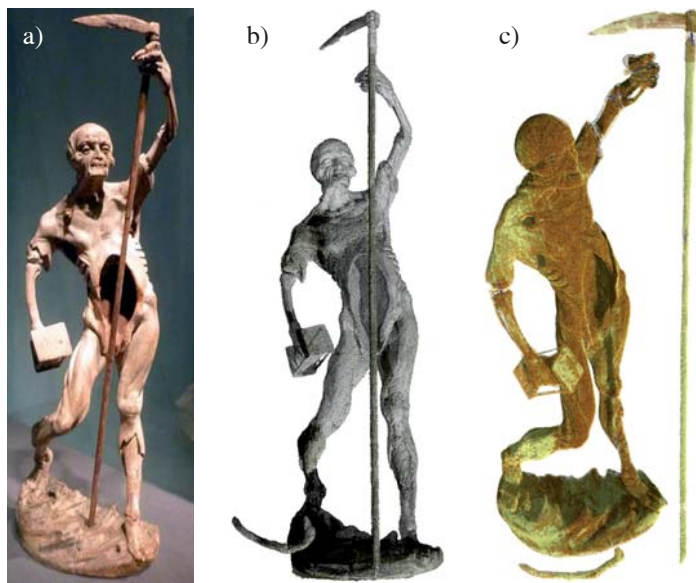
OBRAZEK 253: Ukázka rekonstrukce jednoho tomografického řezu. Vlevo s jednou projekcí, uprostřed integrál prvních sta zpětných projekcí (rotace stolku 45 stupňů), vpravo integrál se všemi naměřenými projekcemi. V řezu vpravo je v dolní části vidět, že byla spodní část sošky doplňována (změna směru letokruhů). Jasná slupka kolem rekonstruovaného řezu indikuje přítomnost polychromie obsahujícího prvky s vyšším atomovým číslem.

Základní princip tomografie není složitý. Během rotace objektu vůči soustavě „rentgenka – detektor“ jsou nahrávány rentgenogramy – takzvané projekce. Běžně je na projekce aplikován přirozený logaritmus a jsou normovány pozadím (rentgenogramem bez objektu). Při takzvané filtrované zpětné projekci jsou tyto projekce po vysokopásmovém filtrování virtuálně projektovány napříč rekonstruovaným objemem, přitom je respektována geometrie prozařování. Pro každý úhel rotace je tak zaznamenána stopa projekce v rekonstruovaném tomografickém řezu, příklad jedné zpětné projekce je na **obrázku 253** vlevo. Výsledná rekonstrukce je integrálem všech zpětných projekcí. V místech, kde nebyl objekt přítomen, je signál pro všechny projekční úhly konstantní, v místech, kde se nacházel objekt, je signál vyšší. Při dostatečném počtu projekčních úhlů dostaneme věrnou informaci o geometrii zkoumaného objektu i o jeho vnitřní struktuře.

V závislosti na rekonstrukčním algoritmu a požadované kvalitě rekonstrukce jsou potřeba stovky až tisíce projekčních úhlů. Na **obrázku 253** uprostřed je ukázka rekonstrukce jednoho řezu, kdy byl použit nedostatečný počet projekcí (100), vpravo je tentýž řez s plným počtem naměřených projekcí (400). Jedná se o rekonstrukci jednoho tomografického řezu sošky Smrtky (Vanitas), uvedené výše, poloha řezu je vyznačena červenou čarou v **obrázku 252** vlevo.

V rekonstrukci řezu v **obrázku 253** vpravo jsou patrné letokruhy dřeva, na hranicích dřeva je patrná bílá vrstva, místně odpovídá vrstvě podkladu a vrstvám polychromie. Ve spodní části je viditelný doplněk. Data byla snímána díky skriptovacím možnostem software Pixelman (Tureček et al. 2011). Použitý rekonstrukční software umožňuje zadat celou geometrii skeneru, včetně jeho nepřesností, program byl vytvořen v prostředí Matlab od MathWorks.

Při tomografické rekonstrukci jsou zrekonstruovány všechny řezy a z těch je posléze složen prostorový model celého objektu. Podobně jak bylo uvedeno výše, nebylo možné v jednom tomografickém záznamu zaznamenat celou řezbu najednou. Byla proto rekonstruována



OBRAZEK 254: a) Foto díla, postava Smrtky drží kosu, had prochází skeletem (Fotografie Národní galerie); b) kompletní rekonstrukce – kosa a had byly v přepravním boxu uloženy odděleně; c) části s nižší hustotou jsou obarveny světlejším odstínem.

zvlášť horní a spodní část sochy, obě rekonstrukce byly posléze spojeny. V **obrázku 254** a **255** jsou ukázány různé způsoby zobrazení tomografické rekonstrukce. Na vizualizaci byl použit software VGmax, MAX 2.2., poskytnutý firmou Volume Graphics GmbH.

Při analýze tomografických dat bylo potvrzeno, že socha byla téměř celá zhotovena z jednoho kusu dřeva, paže byly v loktech připojeny pomocí kovových čepů. V průběhu času zřejmě došlo k poškození některých choulostivých částí řezby. Poškozeny byly například oba bérce. U pravého je vidět významné doplnění jeho hmoty, doplněk nemá kresbu lipového dřeva a má vysoký útlum (vyšší hustota). Podobně byla opravována i levá ruka. V podstavě s řezbou travnatého terénu jsou viditelné drobné praskliny a chodbičky červotoče. Čitelné jsou i drobné dřevořezby a doplňky. Polychromie není na soše dochována spojitě, místně zcela chybí (viz např. kosiště). Kosiště je spojeno ze dvou kusů a dle hustoty dřevní hmoty je z měkčího dřeva, než řezba Smrtky.

Velkoplošné skenování obrazů

V laboratoři rentgenové rentgenografie a tomografie CET bylo rentgenograficky skenováno několik obrazů v celé jejich ploše. Jednalo se například o velký olej, připisovaný Munchovi – článek se připravuje k publikaci; autoportrét van Gogha (vlastník si nepřeje zveřejnění); pravděpodobné falsum Rafaelova deskového obrazu ze soukromé sbírky (vlastník si nepřeje zveřejnění); obraz s přemalbou, pravděpodobně od van Gogha - související článek se připravuje k publikaci.

Z velkoplošných radiografií, realizovaných v laboratoři CET, byly publikovány práce (Žemlička et al. 2014, Hradilová et al. 2014) týkající se dvou obrazů – *Nanebevzetí Panny*

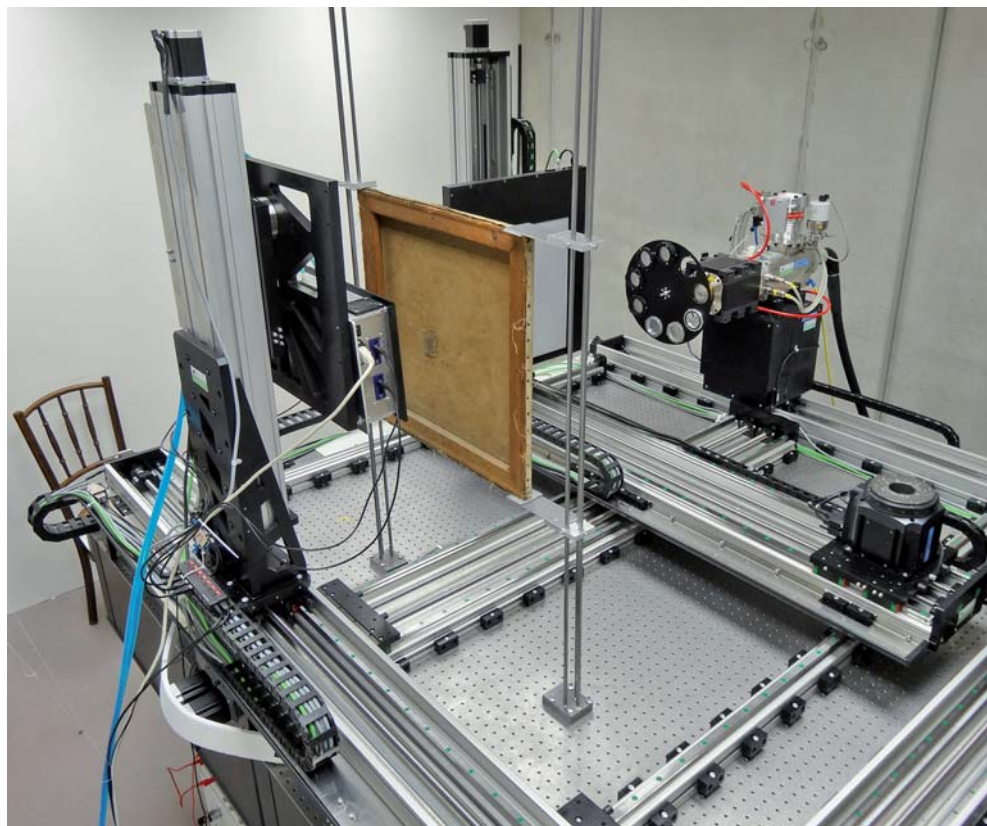


OBRÁZEK 255: Vlevo je vizualizace kovových spojovacích prvků a fragmentů povrchových vrstev; uprostřed je dřevorezba obarvená dle hustoty materiálu se zvýrazněnými fragmenty polychromie; vpravo nahoře je detail spodní části, dobře viditelný hřebíček a výrazně jiná struktura pravého lýtka – zřejmě doplňování materiálu během pozdějších zásahů; vpravo dole je vodorovný řez podstavy, s patrnými chodbičkami červotoče, uprostřed v levé části „vodorovná“ prasklina, v horní části je další prasklina zasahující ke kraji, červená skvrna vpravo nad středem odpovídá přítomnosti kovových prvků.

Marie a Proměnění Páně na hoře z vlastnictví Národního památkového ústavu, Územní památkové správy v Kroměříži, fondu státního zámku Vizovice. Z těchto prací bude citováno v následujícím textu této kapitoly. Cílem rentgenografie byl restaurátorský průzkum zkoumaných děl. Oba obrazy mají rozměr 95 × 64 cm. Pro jejich skenování byl použit velkoplošný pixelový detektor typu Timepix.

Vzhledem k omezené velikosti detektoru byly oba obrazy snímkovány po částech tak, aby se jednotlivé radiogramy mírně překrývaly a ve výsledku pokryly celý obraz. Během měření byl obraz zafixován do statického rámu a skenování bylo zajištěno synchronním pohybem rentgenky a detektoru (viz **obrázek 256**). Rentgenografický systém dovoluje skenování vzorku o rozměrech 140 × 50 cm, a proto bylo v obou případech nutné v polovině měření obrazy otočit o 180 stupňů. Bylo zvoleno minimální možné geometrické zvětšení 1,1×, aby nebylo nutné zvyšovat počet radiogramů.

Jednotlivé rentgenogramy byly měřeny s expoziční dobou 60 s, při napětí rentgenky 90 kV a výkonu na terčíku 5 W. Celá plocha obrazu byla zachycena sérií 54 snímků (9 × 6). Měření včetně všech souvisejících úkonů trvalo 5 hodin. Během zpracování naměřených dat byly snímky sesazeny do jednoho celkového snímku o velikosti 18 400 × 12 000 pixelů (220 Mpx), s rozlišením 50 μm. Výsledný radiogram obrazu *Nanebevzetí Panny Marie* je uveden na **obrázku 257** vlevo nahoře. Při porovnání obrazu ve viditelném světle (**obrázek 257** vpravo nahoře) a v jeho radiografické reprezentaci (**obrázek 257** vlevo nahoře) můžeme



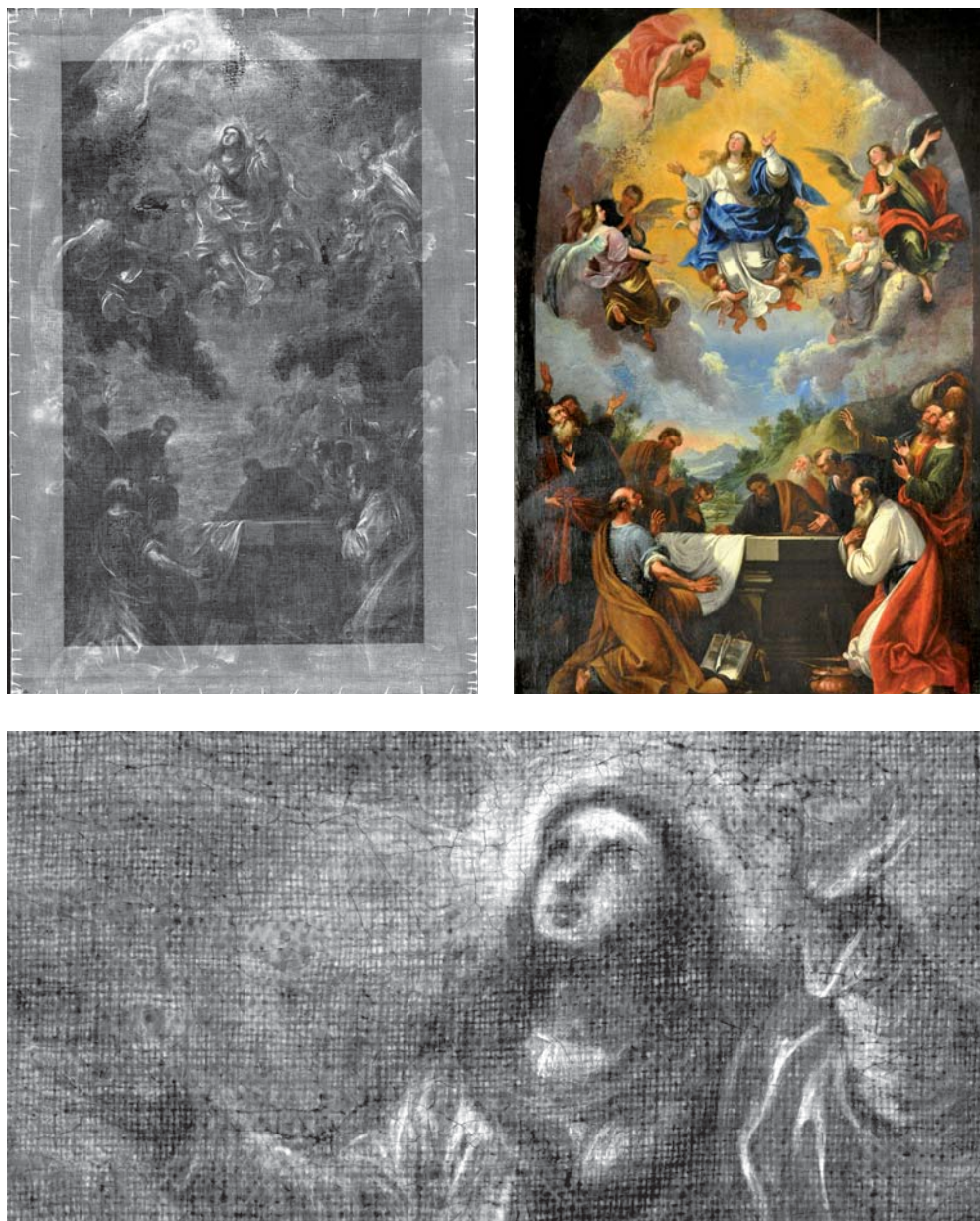
OBRAZEK 256: Fotografie rentgenografického systému laboratoře Centra excellence v Telči, v zobrazovací ose je zleva umístěn velkoplošný pixelový detektor typu Timepix, fixační rám s obrazem a nanofokusová rentgenka s revolverem kalibračních filtrů.

přesně popsat místa poškození malby, přemalby a stav plátěné podložky. Detailnost radiografických informací je dobře patrná ve výřezu (**obrázek 257** dole). Bližší rozbor zjištěných skutečností je uveden v práci Hradilové et al. 2014.

Instrumentace laboratoře rentgenografie a tomografie s vysokým rozlišením v Centru excellence Telč

Rentgenografický/tomografický skener v laboratoři RTG a neutronové tomografie v Centru excellence Telč (CET) kombinuje dvě nezávislé zobrazovací linky v ortogonálním uspořádání. (Fíla et al. 2015) – viz fotografie na **obrázku 258**. Unikátnost skeneru dokladuje udělení evropského patentu (Fíla a Vavřík 2015).

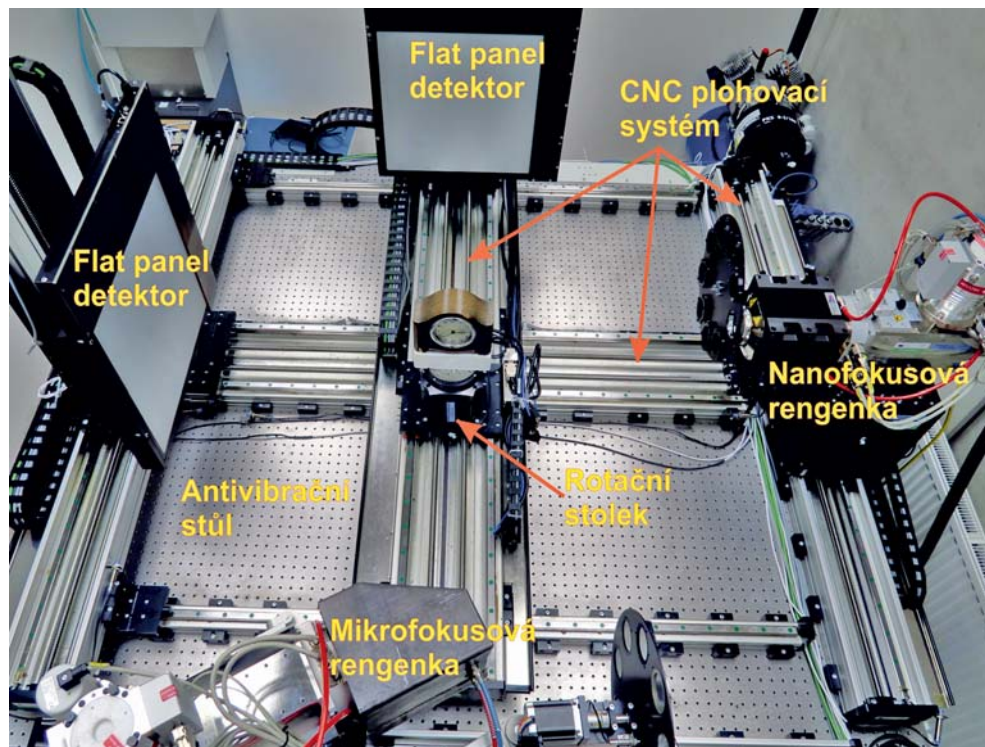
Uspořádání skeneru umožňuje dvojnásobné zrychlení sběru dat pro tomografické rekonstrukce, případně paralelní sběr tomografických dat při dvou různých RTG spektrech současně. Jedna rentgenka má vysoký výkon na terčíku a vysoké maximální urychlovací napětí, přitom relativně malý spot (max. 280 W, 240 kV, spot 4 μm při 20 W), druhá rentgenka má sice nižší výkon, dovoluje ale menší spot (max. 80 W, 160 kV, nejmenší spot 1 μm při 6 W



OBRÁZEK 257: Radiografie obrazu Nanebevzetí Panny Marie vlevo nahoře. Fotografie téhož obrazu ve viditelném světle vpravo nahoře (Foto O. Trmalová). Výřez radiogramu s tváří Panny Marie dole.

na terčičku). Pro tomografické a rentgenografické měření je možné vybrat jen jednu zobrazovací linku, pokud je to pro danou úlohu výhodnější.

Skener je standardně vybaven dvěma velkoplošnými detektory typu Flat panel XRD1622 od firmy Perkin Elmer s aktivní plochou 400×400 mm, s velikostí pixelů $200 \mu\text{m}^2$, 4 Mpx. Rovněž je možné skener alternativně osadit unikátním velkoplošným detektorem typu



OBRÁZEK 258: Fotografie tomografického/rentgenografického skeneru laboratoře Centra excelence v Telči

Timepix (Llopart et al. 2007), s aktivní plochou 140×140 mm a velikostí pixelů $55 \mu\text{m}^2$, 6.5 Mpx (Jakůbek et al. 2014). Tento detektor počítá jednotlivé fotony a umožňuje vybrat rozsah detekované energie, přitom je citlivý již od velmi nízkých energií RTG fotonů (4 keV). Na pracovišti je dále k dispozici zcela nový modulární spektroskopický detektor typu Timepix s paralelním čtením (Vavřík et. al. 2014). Tento detektor se vyznačuje extrémně vysokou rychlostí čtení snímků, kdy je získávána informace o energii každého zaznamenaného fotonu. Díky tomu máme u získaných rentgenogramů i informace o spektru záření, které prošlo zkoumaným objektem.

Skener má plně motorizované osy pro nastavování vzdáleností „rentgenka–vzorek–detektor“, osazené velmi přesným absolutním odměřováním polohy. Osy dovolují plynule měnit projekční zvětšení zhruba od 1,2× až 100×. Použité detektory a dostupné projekční zvětšení umožňuje měnit rozlišení CT rekonstrukcí od 0,2 milimetrů až po submikrometrické. Relativně velký rozsah pohybových os dovoluje rentgenograficky skenovat objekty o ploše až 1 m^2 . Precizní tomografická data jsou získávána také díky motorizovanému stolku na vzduchovém polštáři firmy Aerotech ABRT-150-AS, který má přesnost polohy osy rotace na úrovni $1,50 \mu\text{m}$. Velmi vysoká stabilita systému je dosažena díky antivibračnímu stolu, na kterém je celá sestava umístěna. Absolutní odměřování polohy dává zpětnou vazbu o skutečné geometrii ozařování, zároveň umožňuje parametry této geometrie uložit do datového souboru a znovu kdykoliv vyvolat.

Poděkování

Kapitola vznikla díky projektu „Udržitelný pokročilý rozvoj CET“ LO1219 poskytnutého Ministerstvem školství mládeže a tělovýchovy ČR a projektu NAKI DF12P01OVV048 MK ČR.

Použitá literatura

- Hradilová, J., O. Trmalová a J. Žemlička. Radiografie maleb s vysokým rozlišením (II): dva protějškové obrazy ze zámecké kaple ve Vizovicích – dva zcela odlišné příběhy. In: *Acta Artis Academica 2014*. Praha: Akademie výtvarných umění, 2014. ISBN 978-80-87108-48-2.
- Fíla, T., I. Kumpová, I. Jandajsek, M. Kloiber, D. Tureček a D. Vavřík. Utilization of dual-source X-ray tomography for reduction of scanning time of wooden samples. *Journal of Instrumentation*. 2015, 10(5), C05008. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/10/05/C05008>
- Fíla, T. a D. Vavřík. *A multi-axial apparatus for carrying out x-ray measurements, particularly computed tomography*. Patent číslo: EP2835631-A1, 2016.
- Llopart, X., R. Ballabriga, M. Campbell, L. Tlustos a W. Wong. Timepix, a 65k programmable pixel readout chip for arrival time, energy and/or photon counting measurements. *Nuclear Instruments and Methods A*. 2007, 581(1-2), 485-494. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2007.08.079>
- Jakůbek, J., M. Jakůbek, M. Platkevič, P. Soukup, D. Tureček, V. Sýkora a D. Vavřík. Large area pixel detector WidePIX with full area sensitivity composed of 100 Timepix assemblies with edgeless sensors. *Journal of Instrumentation*. 2014, 9(4), C04018. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/9/04/C04018>
- Tureček, D., T. Holý, J. Jakůbek, S. Pospíšil a Z. Vykydal. Pixelman: a multi-platform data acquisition and processing software package for Medipix2, Timepix and Medipix3 detectors. *Journal of Instrumentation*. 2011, 6(1), C01046. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/6/01/C01046>
- Vavřík, D., M. Holík, J. Jakůbek, M. Jakůbek, V. Kraus, F. Krejčí, P. Soukup, D. Tureček, J. Vacík a J. Žemlička. Modular pixelated detector system with the spectroscopic capability and fast parallel read-out. *Journal of Instrumentation*. 2014, 9(6), C06006. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/9/06/C06006>
- Vavřík, D. a P. Soukup. Metal grain structure resolved with table-top micro-tomographic system. *Journal of Instrumentation*. 2011, 6(11), C11034. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/6/11/C11034>
- Žemlička, J., J. Jakůbek, J. Dudák, J. Hradilová a O. Trmalová. Radiografie maleb s vysokým rozlišením (I): testování a měření velkoplošným pixelovým detektorem. In: *Acta Artis Academica 2014*. Praha: Akademie výtvarných umění, 2014. ISBN 978-80-87108-48-2.