FORUM 2025 / roč. XV / č. 2

PRO KONZERVÁTORY-RESTAURÁTORY
FORUM FOR CONSERVATORS-RESTORERS

2025 / Vol. XV / No. 2
Peer-reviewed open access journal

Chief editor: Ing. Alena Selucká
Editors: Mgr. Pavla Stöhrová, Mgr. Jana Fricová

Editorial Board:
Ing. Ivo Štěpánek (Head of Editorial Board)
doc. Mgr. art. Jakub Ďoubal, Ph.D.
doc. Dr. Ing. Michal Ďurovič
akad. mal. Igor Fogaš
Ing. Pavel Jirásek
Ing. Jan Josef
doc. akad. soch. Petr Kuthan
Ing. Radka Šefců, Ph.D.
Mgr. Pavla Stöhrová (Secretary)

Open acces since 2019 available for free
on https://mck.technicalmuseum.cz/casopis-fkr/
The journal is indexed and abstracted in EBSCO.

Published by:
Technické muzeum v Brně
Purkyňova 105, 612 00 Brno, Czech Republic

Contact for communication:
fricova@tmbrno.cz / stohrova@tmbrno.cz / selucka@tmbrno.cz

© Technické muzeum v Brně, 2025
ISSN (Online) 2571-4384
ISSN (Print) 1805-0050

DOI 10.61574/FKR.2025.2.036

TECHNICKÉ MUZEUM V BRNĚ
METODICKÉ CENTRUM KONZERVACE

PROTOTYPOVÉ ZAŘÍZENÍ PRO NEDESTRUKTIVNÍ ROBOTICKOU MULTIMODÁLNÍ ANALÝZU OBJEKTŮ

Marek Kotrlý[1] • Josef Uher[2] • Jiří Lauterkranc[3]
Jana Boháčová[3] · Ivana Turková[1]

1 Kriminalistický ústav
2 Radalytica a.s., Praha
3 InsightART, s. r. o., Praha

RNDr. Marek Kotrlý, Ph.D., působí v Kriminalistickém ústavu od roku 1994; specializuje se na optickou a elektronovou mikroskopii, rentgenovou difrakci a mikroanalýzu. (marek.kotrly@pcr.cz)

Forenzní oblast dosud postrádala univerzální zařízení pro nedestruktivní charakterizaci a analýzu 2D a 3D objektů. Také rostoucí potřeba analýzy sporných uměleckých děl, kde je vyžadována nedestruktivní analýza alespoň v prvním kroku, vyžaduje multimodální řešení, proto bylo přikročeno k vývoji a testování prototypu zařízení pro robotickou analýzu, zobrazování a mapování 3D objektů. Systém je založen na principu integrace zobrazovacích a analytických technologií do šestiosých robotických ramen, která umožňují značnou flexibilitu velikosti nebo tvaru vzorku s komplikovaným povrchem. Nová generace detektorů rentgenového zobrazování poskytuje vysokou kvalitu obrazu s prostorovým rozlišením v mikrometrickém rozsahu při 2D nebo 3D zobrazování. Základní verze robotického skeneru umožňuje rentgenové zobrazování a mapování jednotlivých fotonů. Aktuálně jsou v rámci systému testovány další modality – energiově disperzní rentgenová difrakce (XRD), rentgenová fluorescenční bodová analýza (XRF) a mapování, multispektrální makrozobrazování a další metody.
Klíčová slova: forenzní analýza, robotická multimodální nedestruktivní analýza, materiálový průzkum, analýza výtvarných děl

PROTOTYPE DEVICE FOR NON-DESTRUCTIVE ROBOTIC MULTIMODAL ANALYSIS OF OBJECTS

Forensic analysis has so far lacked a universal device for non-destructive characterisation and analysis of 2D and 3D objects. Additionally, the growing demand for the analysis of disputed works of art, where non-destructive analysis is required, at least in the initial phase, necessitates multimodal solutions. This led to the development and testing of a prototype device for robotic analysis, imaging, and mapping of 3D objects. The system is based on the integration of imaging and analytical technologies into six-axis robotic arms, which allow significant flexibility in terms of sample size or shape with complex surfaces. The new generation of X-ray imaging detectors provides high-quality images with spatial resolution in the micrometre range for both 2D and 3D imaging. The basic version of the robotic scanner allows for X-ray imaging and individual photon mapping. Currently, other modalities are being tested within the system, including energy dispersive X-ray diffraction (XRD), X-ray fluorescence point analysis (XRF), mapping, multispectral macro-imaging, and other methods.
Keywords: forensic analysis, robotic multimodal non-destructive analysis, material exploration, analysis of works of art

Rentgenové metody jsou široce využívány ve forenzní oblasti. Uplatňují se jak při prvotním screeningu, tak i následných analýzách uměleckých předmětů, ale i v dalších oblastech, kde je potřeba analýza a charakterizace 2D a 3D objektů pro různé expertízy a inspekce (vyšetřování příčin průmyslových nehod a výbuchů, nehod v letectví a automobilní dopravě, požáry atd.). Klasické techniky rentgenového průsvitu používaly filmovou registraci na ploché filmy; ty byly sice nahrazeny zobrazovacími plošnými detektory, ale u větších předmětů byla snímána pouze část nebo bylo nutné snímky skládat a u 3D předmětů byla situace ještě složitější (obr. 1). Navíc jednoduchý rentgenový průsvit již přestával stačit; existuje sice řada průmyslových CT, které jsou ale stavěny na určitou velikost předmětů a pro pokrytí široké

Obr. 1 Klasická instrumentace pro rentgenové zobrazování: rentgenová lampa se zobrazovacím plošným detektorem / Classic instrumentation for X-ray imaging: X-ray tube with imaging area detector

škály velikostí s optimálním rozlišením by bylo nutné používat několik systémů. Klasické i moderní rentgenové nebo synchrotronové metody také jsou široce využívány v oblasti materiálového průzkumu uměleckých děl [Albertin et al., 2009; Gervais et al., 2015; Bernardini et al., 2016; Carlin – Grimaldi, 2024; Vopálenský – Machačko, 2025; a další], nicméně i zde se jedná obvykle o jednoúčelová zařízení.

Jednou z možností, jak pokrýt široké spektrum analyzovaných předmětů s vysokým rozlišením, je využití robotických ramen. Maximální velikost předmětu je následně omezena jen použitými rameny. Vyvíjená zobrazovací technologie v podobě 2D a 3D robotického zobrazovacího systému (RIS) je nejmodernější zobrazovací technologie a výkonná platforma, která je schopná kombinovat řadu zobrazovacích technik, jako je spektrální rentgen, počítačová tomografie, rentgenová difrakce (XRD), rentgenová fluorescence (XRF), multispektrální zobrazování a další a je snadno přizpůsobitelná. Na rozdíl od konvenčních zařízení integrace zobrazovacích technologií na šestiosá robotická ramena dává zobrazování možnost velké flexibility, a to jak ve velikosti, tak i v tvaru vzorku. Systém může nedestruktivně kontrolovat široké spektrum předmětů se složitým zakřivením pomocí ultrazvukových sond, rentgenových metod nebo jiných modalit.

PRINCIP ROBOTICKÉHO ZOBRAZOVÁNÍ

Systém skeneru je postaven na dvou robotických stanicích (obr. 2). Roboti se mohou pohybovat a rotovat volně kolem vzorku v přesně synchronizovaném pohybu. Tento způsob poskytuje téměř úplnou flexibilitu zorných úhlů a charakteristiky použitých detektorů umožňují získat dosud obtížně dosažitelnou kvalitu rentgenového zobrazení.

Nová generace rentgenových zobrazovacích detektorů poskytuje velmi vysokou kvalitu obrazu, při prostorovém rozlišení až na úrovni desítek mikrometrů ve 2D nebo i 3D obrazu. Systém měří téměř všechny běžné 2D a 3D trajektorie rentgenového zobrazování s přesně kalibrovanou a opakovatelnou geometrickou přesností a dosahuje prostorového rozlišení 50 µm nebo lepší dle použitého zdroje a detektoru. Rozlišení cca 50 µm je dáno primárně opakovatelností nastavování pozice existujících robotických ramen. Vyššího rozlišení je možno docílit použitím mikro-fokusových rentgenek s vyřazovacím spotem menším než 50 µm. V tomto případě může být sken prováděn bez pohybu rentgenové lampy, pouze pohybem detektoru. V takovém případě lze použít geometrické zvětšení a docílit rozlišení až na úrovní velkosti emisního spotu rentgenky.

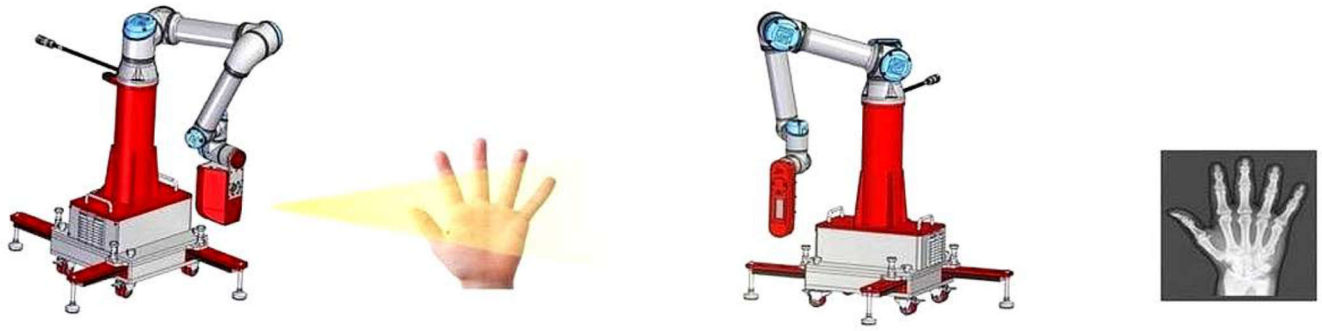
Robotický skener umožňuje implementaci nových přístupů jak pro 2D, tak pro 3D rentgenové zobrazování, zejména v kombinaci s photon-counting detektory. Platforma umožňuje kombinovat několik zobrazovacích modalit s libovolným počtem robotů. Tyto modality zahrnují zobrazování ve viditelném spektru, UV a IR, 3D profilování povrchu, vzduchovou ultrazvukovou kontrolu, 2D rentgenové zobrazování a výpočetní tomografii (CT).

RENTGENOVÉ ZOBRAZOVÁNÍ

Standardní konfigurace pro rentgenové zobrazování zahrnuje dvě šestiosé robotické stanice. Jeden robot nese rentgenovou trubici a druhý detektor. Systém je schopen provádět přesné geometrické kalibrace, které umožňují libovolné umístění obou robotů. Roboti mohou být během analýzy na místě nebo se pohybovat podél snímaného artefaktu. Obrázek 3 ukazuje systém v přenosné konfiguraci, kde jsou roboti umístěni na kolečkových podstavcích.

Pro měření pomocí robotických ramen je důležitá geometrická kalibrace pozic základen obou ramen. V běžné praxi se takové pozice získají při konstrukci zařízení, které roboty používá. V případě přenosného systému nelze tento přístup použít. Proto byly vyvinuty metody kalibrace vzájemné pozice robotů, a to mechanicky, propojením obou robotů přesnou spojkou, odečtením hodnot enkodérů v kloubech robotů a výpočtem pozic základen. Tento první přístup ovšem vyžaduje možnost fyzického propojení robotů. Druhý přístup je založen na využití rentgenového svazku.

Obr. 3 Systém v přenosné konfiguraci při analýze uměleckého díla / System in a portable configuration during the analysis of a work of art



Obr. 2 Princip robotického skeneru: dvě robotická šestiosá ramena, která jsou přesně synchronizována, měří jednotlivá pole, která jsou skládána do celkového obrazu. Flexibilita šestiosých robotů umožňuje skenování i velice komplexních tvarů. Zleva – robot 1 s rentgenovou lampu, vzorek, robot 2 s detektorem, výsledný snímek / Principle of the robotic scanner: two six-axis robotic arms, precisely synchronised, measure individual fields which are then assembled into a complete image. The flexibility of the six-axis robots allows for scanning even highly complex shapes. From the left — robot 1 with X-ray tube, sample, robot 2 with detector, resulting image

Tato druhá metoda umožňuje kalibraci přes zkoumaný objekt. Podrobnosti jsou předmětem patentového řízení, které v době přípravy článku probíhá.
V průběhu skenování mimo stíněnou místnost nebo box je potřeba zajistit také dodatečnou radiační bezpečnost. Postupy se ale neliší o zajištění radiační bezpečnosti v průběhu nedestruktivních kontrol prováděných pomocí radio-izotopů nebo rentgenových lamp, tedy omezení přístupu do nebezpečné vzdálenosti. Vzhledem k nízkým výkonům používaných rentgenových zdrojů je bezpečná vzdálenost typicky na úrovni několika desítek metrů v případě volného prostoru. Vzdálenost se zkracuje, jsou-li v cestě záření další překážky. Radiační ochrana musí splňovat požadavky zákona č. 263/2016 Sb. (zejména § 4, 95–107, 100–101, 104, 106) a vyhlášky č. 359/2016.
Systém využívá plně možností robotických ramen jako funkčních skenovacích prvků, které skenují podél a kolem šesti různých os, tj. tří os X, Z, Z a tří os rotace. Proto není nutné používat další rotační stůl pro CT skeny, na rozdíl od běžných rentgenových skenerů, kde se robotická ramena používají pro nakládání/vykládání vzorků nebo jako flexibilní stativ pro pasivní umístění rentgenových trubic a detektorů vůči aktivnímu skenovacímu prvku (např. rotační stůl).
Velikosti pixelových matic detektorů se pohybují od 256 × 1280 do 512 × 1280 pixelů v závislosti na verzi. Každý pixel obsahuje analogovou a digitální elektroniku pro zpracování elektrických pulzů generovaných rentgenovým zářením přímo v senzoru. Detektory provádí přímou konverzi (radiace se přímo konvertuje na signál) na rozdíl od scintilačních zobrazovačů, kde se rentgenové záření nejprve přemění na světlo a poté na elektrický signál. Přístup přímé konverze eliminuje většinu zdrojů šumu v pixelech, což výrazně zlepšuje kontrast a poměr signálu k šumu ve výsledném zobrazení. Elektronika zpracovává každý detekovaný pulz jednotlivě, je možné proto porovnat pulzy s předem definovanými úrovněmi diskriminace (prahy). Pouze pulzy způsobené zářením s energií vyšší než práh jsou zaznamenány v digitálním čítači, který může být nastaven až na 24 bitů. Druhý robot na opačné straně zkoumaného předmětu nese rentgenovou lampu. Systém je kompatibilní s různými rentgenovými trubicemi. Rozsah velikosti spotu je 5–50 µm a rozsah provozního napětí je 10–130 kVp. Velmi vysoká citlivost, prostorové rozlišení a dynamický rozsah použitých detektorů umožňují posouvat kvalitu rentgenového obrazu až na její fyzikální meze. Díky vysoké citlivosti detektorů jsou typická napětí rentgenové trubice potřebná při skenování o 20 až 30 % nižší než u běžných systémů. Systém je univerzální a různé typy vzorků mohou vyžadovat různé strategie rentgenových skenů pro zachycení požadovaných informací. Flexibilita pohybu obou robotů umožňuje téměř libovolný rozsah přístupů ke scénářům pro 2D a 3D skenování.

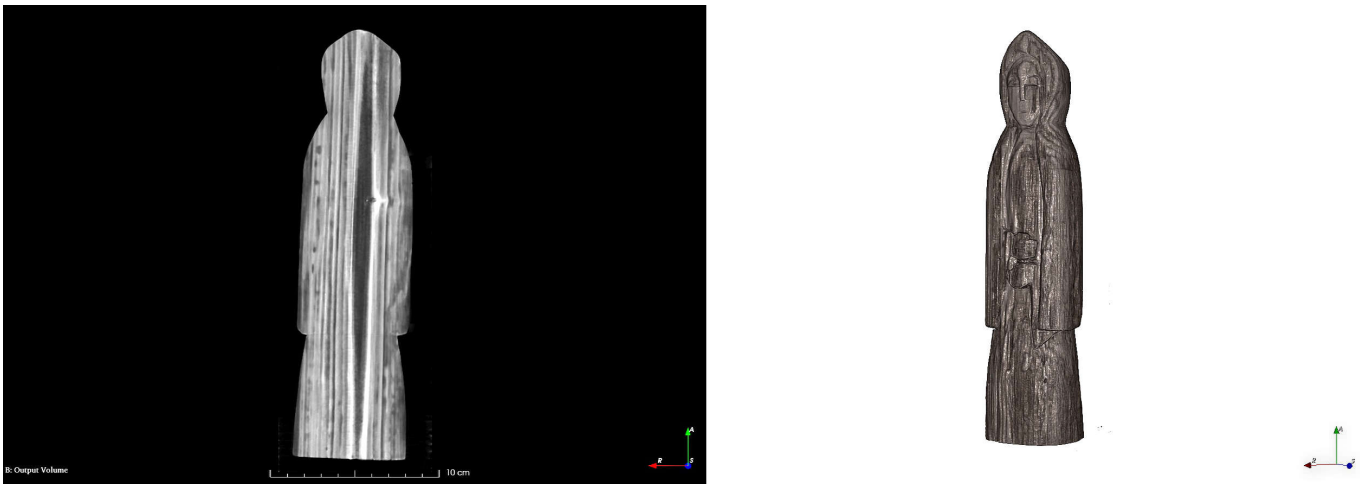
Robotická ramena jsou schopná pohybu ve všech směrech v rámci souřadnicového systému X, Y, Z a nabízí zcela nové možnosti pro radiografické zobrazování. Jsou možné zobrazovací techniky podobné těm, které se používají v „klasických“ metodách, stejně jako zcela nové přístupy, které by nebyly možné bez robotických ramen. Ramena také poskytují vylepšené schopnosti pro skenování nepravidelných objektů. Terminologie pro možnosti skenování pomocí robotických ramen ještě není pevně stanovena. V literatuře jsou občas používány termíny jako „CT s libovolnou trajektorií“ [Ghita et al., 2022] nebo „robotické CT s libovolnou trajektorií“ či terminologie z „klasického“ radiografického zobrazování (např. tomosyntéza atd.).
Pro plánování skenování robotický systém používá „centrální referenční rámec“, který definuje, jak se roboti pohybují během plánování skenování, jak jsou zobrazeny souřadnice jejich polohy a orientace a jak bude plánovaný skenovací proces proveden [Reinhold et al., 2023].

2D rentgenové zobrazování

2D rentgenové snímky jsou nezbytným nástrojem pro nedestruktivní analýzu. Rentgenové CT skeny mohou být časově náročné, zejména u velkých a složitých předmětů. Byla zavedena nová metoda skenování, „skenování s paralelním svazkem“, pro ploché vzorky a tenké vzorky (např. obrazy). Systém pohybuje zároveň jak detektorem, tak i s rentgenovou trubicí tak, aby získal více překrývajících se snímků z různých pozorovacích bodů a pokryl celou plochu panelu. To umožňuje zpracování částí skenovacích dlaždic, kde je objekt pozorován kolmo, čímž se vytvoří virtuální paralelní svazek. Výsledné snímky ze skenování s paralelním paprskem mají jednotné zvětšení a úhel pohledu po celém rentgenovém snímku. Dochází ke zmírnění paralaxních efektů a čitelnost je výrazně zlepšena [Uher – Boháčová, 2024]. Metoda umožňuje skenování velkých ploch s použitím krátké vzdálenosti rentgenka–detektor, všechna místa skenu jsou „viděna“ pod stejným úhlem. Naproti tomu při použití standardních metod se mění vzdálenost mezi zdrojem záření a pixelem detektoru. Tím se čitelnost rentgenových snímků snižuje. Paralaxní zkreslení, které vzniká při pozorování pod divergujícím úhlem kuželového rentgenového paprsku, je velmi výrazné zejména u velkých objektů.

CT skeny s libovolnou trajektorií

CT projekce mohou být získány skenováním z různých úhlů a pozic. Robotická ramena jsou funkčními skenovacími elementy pro 3D translaci a rotaci. Systém je vybaven robotickými rameny se šesti klouby, která mohou nezávisle a volně umisťovat detektor a rentgenovou trubici kolem skenovaných objektů. Může vykonávat různé typy konvenčních trajektorií CT skenů bez nutnosti změny mechaniky. Umístění rentgenové trubice je

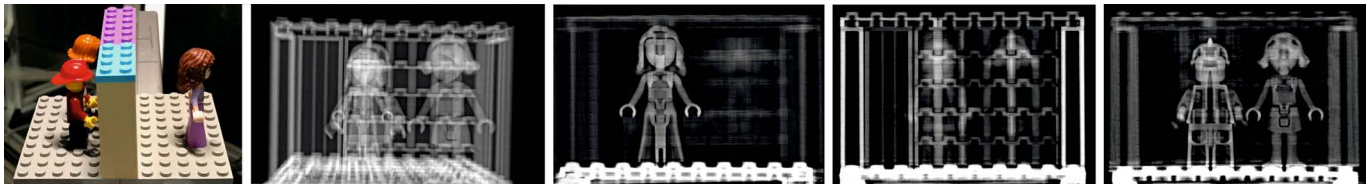


Obr. 4 Příklad CT dřevěné sochy pro ověření její vnitřní homogenity a získání dat pro dendrochronologii. Vlevo řez, vpravo CT rekonstrukce / Example of CT of a wooden sculpture to verify its internal homogeneity and to obtain data for dendrochronology. Left: cross-section, right: CT reconstruction

nezávislé na umístění zobrazovacího detektoru. Tato flexibilita umístění umožňuje nové typy trajektorií skenování, nebo dokonce kombinaci 2D skenovacích strategií při několika úhlech a pozicích pro vytvoření optimálních CT projekcí, které zohledňují přístupnost části a její vnitřní strukturu [Borg et al., 2018]. Běžná metoda CT s kuželovým paprskem obvykle zahrnuje skenování kolem vertikální nebo horizontální osy. CT skeny s robotickým systémem jsou možné kolem téměř libovolné osy ve třech rozměrech. Rentgenové zorné pole kuželového paprsku a velikost detektoru neomezují velikost projekce, protože každá projekce je měřena pomocí „rozšířeného skenování se zorným polem“ nebo strategie skenování s paralelním paprskem (obr. 4).

Ekvivalent „klasických“ metod tomosyntézy – „zaostření rentgenového paprsku na vybranou hloubku“

2D rentgenové snímky se složitými vnitřními strukturami jsou často těžko interpretovatelné. V 2D skenech se objekty překrývají ve směru do hloubky na jednu obrazovou rovinu. Měnící se zvětšení ve směru hloubky materiálu je dalším omezením (obr. 5, druhý obrázek zleva). Proto jsou používány různé trajektorie tomosyntézy pro rozlišení hloubkové informace, když je přístupnost pro plné CT omezená. Výsledné snímky mají správné absolutní rozměry u všech hloubkových vrstev objektu. Kvůli omezenému rozsahu úhlů ale není hloubkové rozlišení tak dobré jako u plného CT (obr. 5).



Obr. 5 *Demo vzorek pro tomosyntézu. Zleva: (1) Fotografie vzorku: tři lego figurky. (2) Typický 2D rentgenový snímek, který je velmi těžko čitelný kvůli překrývajícím se strukturám a různě zvětšeným objektům. (3, 4, 5) Obrázky tomosyntézy zaostřené do různé hloubky – čitelnost snímků je výrazně lepší a velikosti jsou ve správném měřítku, což umožňuje metrologii / Demo sample for tomosynthesis. From the left: (1) Photograph of the sample: three LEGO figures. (2) Typical 2D X-ray image, which is very difficult to interpret due to overlapping structures and differently magnified objects. (3, 4, 5) Tomosynthesis images focused at different depths — the readability of the images is significantly improved and the sizes are to scale, enabling metrology*

PŘÍKLAD RADIOGRAFICKÉHO PRŮZKUMU VÝTVARNÉHO DÍLA

Na zkoumaném obraze *Hráči karet* jsou namalovány dvě mužské postavy, které sedí naproti sobě v temné místnosti a hrají karty (obr. 6). Celá scéna je velice temná, pravděpodobně i z důvodu přítomnosti nepůvodních přemaleb, ztmavlých lakových vrstev a povrchových nečistot. Ve spodním pravém rohou se nachází signatura Schikaneder, jejíž čitelnost lehce zhoršuje právě přítomnost vrchních lakových vrstev a nečistot. Plátno je napnuté na dřevěném vypínacím rámu a obraz je vsazen do dřevěného zlaceného zdobného rámu.

Dílo bylo zkoumáno pomocí materiálově citlivé rentgenové mikroradiografie s vysokým rozlišením v robotickém skeneru. Jako zdroj rentgenového záření byla použita rentgenka OXFORD INSTRUMENTS. Pro detekci radiografického obrazu byl použit PCC detektor Widepix 2(1)x5, skener ID 003, napětí na rentgence 50 kVp, proud rentgenky 1 mA, vzdálenost rentgenky od obrazu 50 cm, rozlišení 55 µm, doba měření 6,5 hodiny. Systém je schopen rentgenového hyperspektrálního zobrazování, kde se měří celé rentgenové spektrum procházející vzorkem. Spektrální informace lze použít k identifikaci různých heterogenních materiálů zkoumaného vzorku/díla. Rentgenové snímky mohou být následně obarvené podle specifických energií detekovaných materiálů, což umožňuje extrahovat i pouze specifické materiály. Vzorky lze skenovat pomocí režimu, kde se rentgenová trubice a detektor pohybují společně. Výhodou tohoto skenovacího režimu je, že vzdálenost rentgenového zdroje a detektoru může být krátká, čímž se zvýší intenzita rentgenového paprsku a zvyšuje se rychlost skenování.

Provedený radiografický spektrální průzkum díla přinesl některá zásadní zjištění o jeho celkovém technickém stavu, materiálové struktuře a o jeho historických konotacích. Nejdůležitějším zjištěním je, že původní dílo bylo v minulosti celoplošně přemalováno, čímž došlo částečně ke změně jednotlivých motivů díla. Pořízený hyperspektrální radiografický snímek jednoznačně definuje úroveň, lokalizaci a intenzitu nepůvodních přemaleb (obr. 7). Nepůvodní přemalba například zakrývá bohaté zátiší situované v popředí výjevu před stolem, na kterém muži hrají karty. Toto zátiší zobrazuje skleněnou karafu, sklenice s pivem, chléb, maso, zeleninu a nůž na dřevěném sudu (obr. 8). Další významná změna se nachází na postavě levého hráče, původní postava byla namalována jako voják v uniformě (pravděpodobně pruské) z období I. světové

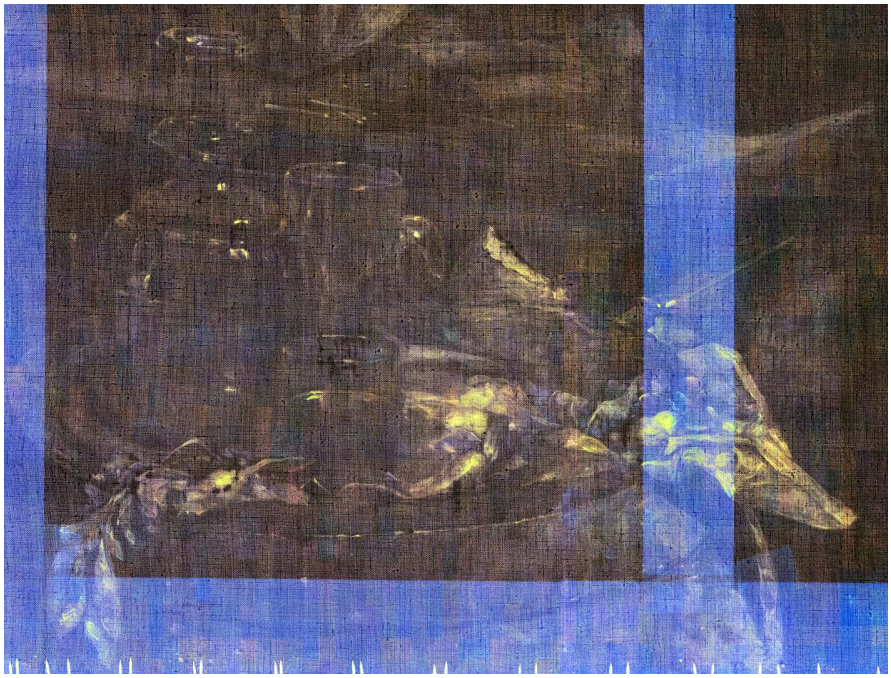
Obr. 6 *Zkoumané dílo Hráči karet / Work of art under investigation: The Card Players*

války. Původně měla tato postava vojenskou čapku, ale ta byla částečně seškrábána před aplikací nepůvodní přemalby. Na obličeji této postavy se také nachází vrstva přemaleb. Pozadí výjevu/interiér je také přemalováno a tato přemalba znemožňuje vyznění původního konceptu architektury interiéru. Úroveň vrstvy přemalby se ztenčuje směrem k pravé spodní straně obrazu. Na pravé postavě hráče karet má již přemalba charakter spíše zabarveného laku, jehož intenzita slábne směrem k signatuře, kterou již téměř nepřekrývá (obr. 9). Ve vrchní části obrazu se nachází vodorovný šev po celé šíři díla. Tento spoj však není sešitý, oba původní kusy plátna jsou nalepené na nepůvodní dublovací plátěné podložce/rentoalage. Vrchní odříznutý díl plátna je jednoznačně původní, jelikož má shodnou energetickou odezvu s navazujícím zbytkem malby. Příčina tohoto zákroku je nejasná. Porovnáním černobílého a barevného (v nepravých barvách) radiografického snímku lze dobře posoudit výhody spektrálního zobrazení. Na obr. 10 v barevném radiografickém snímku v levo lze snadno rozeznat rozložení jednotlivých pigmentů v původní malbě. Také je dobře patrný šev nastaveného plátna v horní části obrazu. Vzhledem k tomu, že má struktura nastaveného plátna shodný charakter se zbytkem obrazu, je toto nastavení součástí původní kompozice díla, ale pravděpodobně zde došlo k redukci původního rozměru v rámci milimetrů, maximálně centimetrů. Toto potvrzuje i barevný radiografický snímek; pigmenty, které se zobrazují na doplňku, mají shodnou energetickou hodnotu jako na spodní části malby.
Výsledky ze spektrálního radiografického průzkumu díla byly použity pro přesné nastavení restaurátorských postupů v průběhu snímání nepůvodní vrstvy přemalby. Díky přesné znalosti rozvržení a úrovně nepůvodních zásahů se restaurátor mohl důkladně orientovat při odkrývání originální malby od Jakuba Schikanedera [Lauterkranc, 2019].

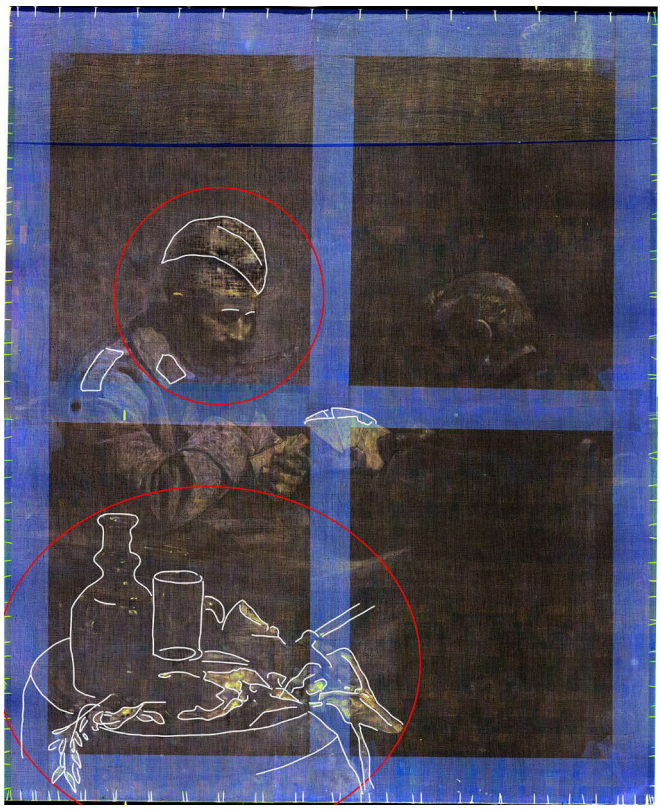
Obr. 7 *Výsledný spektrální radiografický snímek odhaluje původní kompozici malby, bohaté zátiší situované v popředí výjevu před stolem, na kterém muži hrají karty. Zátiší zobrazuje skleněnou karafu, sklenice s pivem, chléb, maso, zeleninu a nůž na dřevěném sudu. Další významná změna se nachází na postavě levého hráče: původní postava byla namalována jako voják v uniformě (pravděpodobně pruské) z období I. světové války, původně měla postava vojenskou čapku / The resulting spectral radiographic image reveals the original composition of the painting: a rich still life situated in the foreground of the scene, in front of a table where men are playing cards, depicting a glass carafe, beer glasses, bread, meat, vegetables, and a knife on a wooden barrel. Another significant change can be observed in the figure of the left player, where the original figure was painted as a soldier in uniform (likely Prussian) from World War I, originally depicted wearing a military cap*

ZÁVĚR

Vícerobotická platforma RadalyX se ukazuje jako vysoce flexibilní nástroj pro nedestruktivní testování a jako univerzální výzkumné zařízení [Kotrly et al., 2023]. Flexibilita robotů umožňuje aplikaci systému v široké škále běžných analytických scénářů a otevírá nové možnosti a přístupy ke skenování, které dříve nebyly možné.
Systém pokrývá širokou škálu možností skenování, od velkoplošných 2D rentgenových skenů, kdy je rentgenová trubice pevně umístěna na jednom místě, až po pokročilé skeny. Dostupné geometrie lze rozšířit na libovolně zakřivené tvary a konstrukce také otevírá nové možnosti pro CT snímkování. Protože robotický CT skener může být přiveden k vzorku, místo aby byl vzorek přenesen k němu, mohou být CT měření prováděna na předmětech a v situacích, kde to bylo dříve nemožné. To je umožněno flexibilitou robotů a také pokročilým softwarem pro jejich řízení a kalibraci, který byl vyvinut v rámci představené práce.
V rámci radiografického průzkumu výtvarného díla *Hráči karet* bylo zjištěno, že v minulosti byla záměrně z neznámých příčin pozměněna originální autorská koncepce díla.



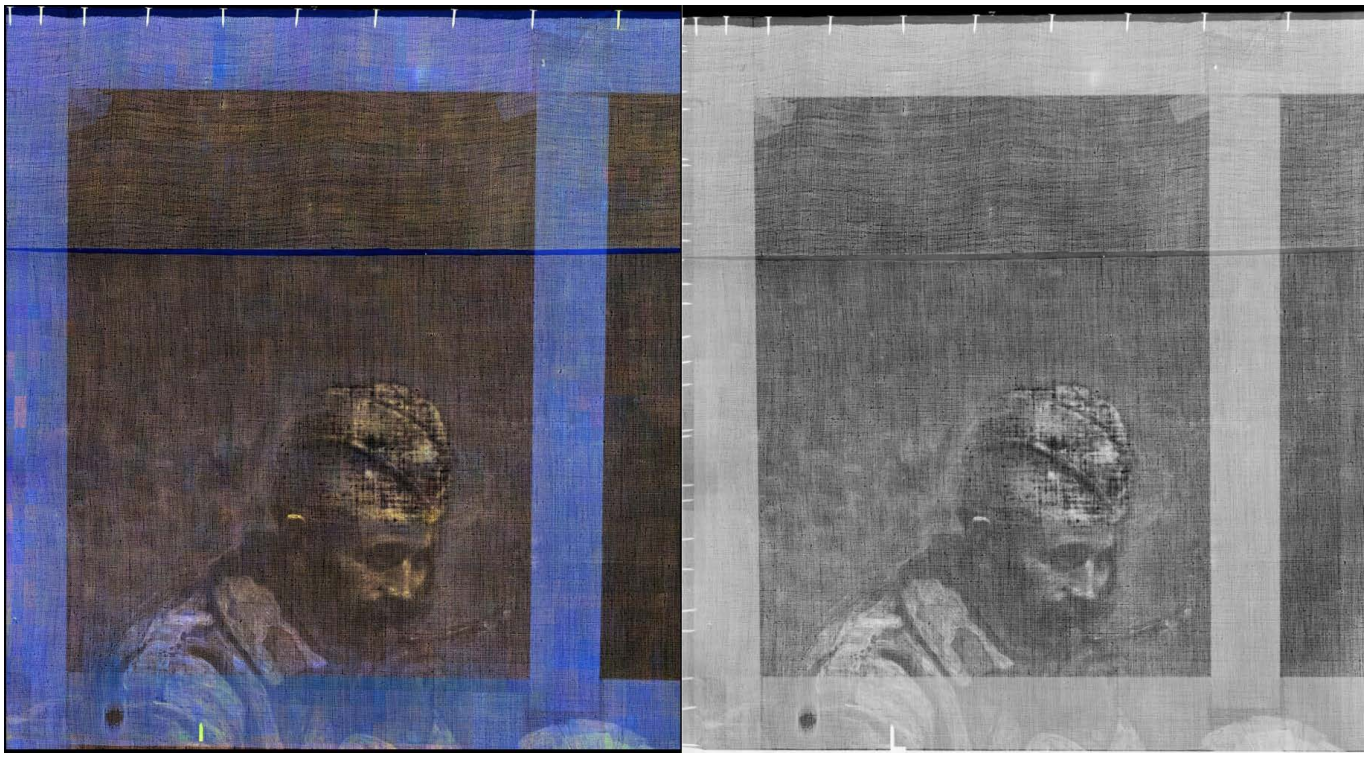
Obr. 8 *Detail původního zátiší, které se nachází pod vrstvou nepůvodních přemaleb / Detail of the original still life beneath the layer of non-original overpainting*



Originální malba byla v dobrém stavu zachována pod vrstvou nepůvodních přemaleb a bylo tedy možné dílu navrátit jeho původní vzhled v procesu celkového restaurování. Výsledné radiografické snímky jednoznačně definovaly rozsah a lokaci nepůvodních zásahů a přemaleb a posloužily jako důležitý informační materiál v průběhu restaurování díla. Na signatuře v pravém spodním rohu se nenacházela žádná nepůvodní přemalba, ale pouze vrstva obarveného laku. Signatura se nachází na vrstvě původní malby, a je tedy originální.

Celý prototyp prochází finálním testováním všech modalit na reálných vzorcích a bude nasazen do praxe Znalecké služby PČR na konci roku 2025. Dvě metodiky pro komplexní použití systému již úspěšně prošly certifikačním procesem a třetí metodika je aktuálně certifikována.

Obr. 9 *Zákres jednotlivých částí přemalované originální malby. Změna kompozice karet pravého hráče je však autorská a byla provedena malířem již při vzniku díla, jedná se o takzvané pentimenti / Drawing of individual sections of the overpainted original painting. However, the change in the composition of the right player's cards is an artistic choice made by the painter during the creation of the work, known as pentimenti*



Obr. 10 *V barevném radiografickém snímku vlevo lze snadno rozeznat rozložení jednotlivých pigmentů v původní malbě. Také je dobře patrný šev nastaveného plátna v horní části obrazu. Vzhledem k tomu, že má struktura nastaveného plátna shodný charakter se zbytkem obrazu, je toto nastavení součástí původní kompozice díla, ale pravděpodobně zde došlo k redukci původního rozměru v rámci milimetrů, maximálně centimetrů. Toto potvrzuje i barevný radiografický snímek: pigmenty, které se zobrazují na doplňku, mají shodnou energetickou hodnotu jako na spodní části malby / In the colour radiographic image on the left, the distribution of the individual pigments in the original painting is easily recognisable. The seam of the stretched canvas at the top of the image is also clearly visible. Since the structure of the stretched canvas is consistent with the rest of the image, this adjustment is part of the original composition of the work, although it likely involved a reduction in the original size by a few millimetres, or at most centimetres. This is further confirmed by the colour radiographic image, where the pigments on the addition display have the same energy value as those on the lower part of the paintin*

LITERATURA

- ALBERTIN, F.; FRANCONIERI, A.; GAMBACCINI, M. et al. A quasi-monochromatic X-rays source for art painting pigments investigation. *Appl. Phys*. 2009, A 96, s. 503–510.
- ALBERTIN, F.; BETTUZZI, M.; BRANCACCIO, R.; Morigi, M. P. a Casali, F. X-Ray Computed Tomography In Situ: An Opportunity for Museums and Restoration Laboratories. *Heritage*. 2019, **2**(3), pp. 2028–2038.
- ALFELD, M.; JANSSENS, K. a DIK, J. Optimization of mobile scanning macro-XRF systems for the in situ investigation of historical paintings. *J. Anal. At. Spectrom*. 2011, **26**, s. 899–909.
- ALFELD, M.; PEDROSO, J. V.; VAN EIKEMA HOMMES, M. et al. A mobile instrument for in situ scanning macro-XRF investigation of historical paintings. *J. Anal. At. Spectrom*. 2013, **28**(5), s. 760–767.
- AMBROSINI, D.; DAFFARA, C.; DI BIASE, R. et al. Integrated reflectography and thermography for wooden paintings diagnostics. *Journal of Cultural Heritage*. 2010, **11**, issue 2, p. 196–204.
- BERNARDINI, F.; VECCHIET, A.; DE MIN, A., et al. Neolithic pottery from the Trieste Karst (northeastern Italy): A multi-analytical study. *Microchemical Journal*. 2016, vol. **124**, p. 600–607.
- BLUMENSATH, T.; O'BRIEN, N. a WOOD, C. E. Calibration of Robotic Manipulator Systems for Cone-Beam Tomography Imaging. *Transactions on Nuclear Science*. 2018, vol. **65**, no. 7, pp. 1384–1393.
- BONIZZONI, L.; BRUNI, S.; GUGLIELMI, V. et al. Field and laboratory multi-technique analysis ofF pigments and organic painting madia from an egyptian cofin (26th dynasty). *Archaeometry*. 2011, **53**, s. 1212–1230.
- BOONE, J. M. a MCCOLLOUGH, C. H. Computed tomography turns 50. *Physics Today 1*. 2021, **74**(9), s. 34–40.
- BORG, L. F.; JÜRGEN, F.; JØRGENSEN, J. S. a QUINTO, E. T. Analyzing Reconstruction Artifacts from Arbitrary Incomplete X-ray CT Data. *SIAM Journal on Imaging Sciences*. 2018, vol. **11**, no. 4, pp. 2786–2814.
- BORG, L. F.; JÜRGEN, F.; JØRGENSEN, J. S. a QUINTO, E. T. Analyzing Reconstruction Artifacts from Arbitrary Incomplete X-ray CT Data. *SIAM Journal on Imaging Sciences*. 2018, **11**(4), s. 2786–2814.
- CARLIN, M. G. a GRIMALDI, N. From death to the Virgin birth: Multi-analytical investigation of a suspected 16th century painting. *Forensic Science International*. 2024, vol. **10**, pp. 1–10.
- FISHER, S.; HOLMES, D.; JORGENSEN, J. et al. Laminography in the Lab: Imaging planar objects using a conventional x-ray CT scanner. *Measurement Science and Technology*. 2019, **30**.
- FLYNN, D. O. et al. Materials identification using a small-scale pixellated x-ray diffraction system. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2016, vol. **49**, 17, pp. 17–49.
- GERVAIS, C.; THOURY, M.; RÉGUER, S. et al. Radiation damages during synchrotron X-ray micro-analyses of Prussian blue and zinc white historic paintings: detection, mitigation and integration. *Appl. Phys*. 2015, A 121, s. 949–955.
- GHITA, M.; UHER, J.; BOHÁČOVÁ, J. a KADEŘÁBEK, R. Arbitrary Path CT by Multi-Robot Imaging Platform (RADALYX). *Book of abstracts 11TH ICT 2022 Wels Austria*, s. 1–10.
- GOLDMAN, L. W. Principles of CT and CT Technology. *Journal of Nuclear Medicine Technology*. 2007, vol. **35**, 3, pp. 115–128.
- HOUCK, M. a SMITH, G. D. The forensic mindset: art and crime. *Forensic Sci Int Synerg*. 2021, **3**, 100143.
- KOGOU, S.; LUCIAN, A.; BELLESIA, S. et al. A holistic multimodal approach to the non-invasive analysis of watercolour paintings. *Appl. Phys*. 2015, A 121, s. 999–1014.
- KOTRLÝ, M.; UHER, J.; BOHÁČOVÁ, J. a TURKOVÁ, I. Prototype Robotic System for Multimodal Forensics and Failure Analysis. *Microscopy and Microanalysis*. 2023, **29** (suppl 1), s. 94–95. ISSN: 1431-9276.
- LAMBERT, J.; PHILLIPS, E. a VILLANUEVA-M. J. Axial or Helical? Considerations for wide collimation CT scanners capable of volumetric imaging in both modes. *Medical Physics*. 2017, **44**. Dostupné z: https://doi.org/10.1002/mp.12525.
- LAUTERKRANC, J. *Radiografický průzkum díla - Jakub Schikaneder Hráči karet*. Samostatná zpráva, MS, archiv InsightART. Praha, 2019.
- LEGRAND, S.; VANMEERT, F.; VAN DER SNICKT, G. et al. Examination of historical paintings by state-of-the-art hyperspectral imaging methods: from scanning infra-red spectroscopy to computed x-ray laminography. *Heritage Sci*. 2014, **2**(13).
- MORIGI, M. P.; CASALI, F.; BETTUZZI, M. et al. Application of X-ray Computed Tomography to Cultural Heritage diagnostics. *Appl. Phys*. 2010, A 100, s. 653–661.
- O'BRIEN, N. S.; BOARDMAN, R. P.; SINCLAIR, I. et al. Recent advances in x-ray cone-beam computed laminography *J. X-Ray Sci. Technol*. 2016, **24**, s. 691–707.
- O'BRIEN N. et al. Comparing cone beam laminographic system trajectories for composite NDT. *Case Studies in Nondestructive Testing and Evaluation*. 2016, vol. **6**, part B, pp. 56–61.
- RE, A. et al. X-ray tomography of large wooden artworks: the case study of "Doppio corpo" by Pietro Piffetti. *Heritage Science*. 2014, **19**(2).
- REINHOLD, J.; HEILEMANN, L. L. a LIPPROSS S. Optimal path, orientation and trajectory planning along arbitrarily shaped surfaces for image-based robot-automated medical procedures. *Control Engineering Practice*. 2023, vol. **139**, 105656.
- RICCA, M.; ALBERGHINA, M. F.; RANDAZZO, L. et al. Combined Non-Destructive and Micro-Destructive Approach to Solving the Forensic Problems in the Field of Cultural Heritage: Two Case Studies. *Appl. Sci*. 2021, **11**, 6951.
- SANNED, D., et al. Arbitrary position 3D tomography for practical application in combustion diagnostics. *Meas. Sci. Technol*. 2022, **33**, 125206.
- UHER, J. a BOHÁČOVÁ, J. RadalyX – Robotic X-ray scanner: applications in aerospace and material industry. *Book of abstracts 13th ICT 2024 Wels Austria*. 2024, s. 1–7.
- VOPÁLENSKÝ M. a MACHAČKO, L. Twinned Orthogonal Adjustable Tomograph Device in Conservation Services: Case Studies of a Recent X-ray Investigation into Baroque Oil Paintings. *ChemPlusChem*. 2025, 2500063.