

# Kódované fotometrické stereo pro dokumentaci a prezentaci drobných sbírkových předmětů

Jaroslav Valach

Vytváření digitálních třírozměrných modelů těles je oborem, kterému je věnována narůstající pozornost. V oblasti péče o kulturní dědictví a jeho zachování jde především o vytváření třírozměrných virtuálních replik vzácných předmětů a zpřístupňování sbírek nejširším okruhům zájemců, ať už profesionálních badatelů, nebo veřejnosti. Tím se otevírá možnost plně demokratického přístupu k historickému dědictví lidstva. Mimo digitální objekty manipulovatelné na dálku prostřednictvím počítačových sítí se také jedná o vytváření materiálních kopií digitalizovaných předmětů pomocí 3D tiskáren. Takové hmotné objekty nacházejí uplatnění nejen ve speciálních archeologických výzkumech, v nichž není možné použít originál, ale také například jako suvenýry.

## Metody prostorové digitalizace objektů

Obvykle se k digitalizaci objektů používají zařízení pracující na principu stereoskopického vidění, vyhodnocení paralaxy nebo deformace promítané pravidelné mřížky. Stereoskopické metody jsou založeny na záznamu tělesa dvěma kamerami, na kterých se různé body povrchu tělesa promítají na různá místa obrazů v závislosti na vzdálenosti mezi daným bodem na tělese a kamerou. Z geometrického rozboru měření vyplývá, že citlivost metody klesá se vzdáleností objektu od zařízení a také jsou pro tuto metodu problematická „plochá“ tělesa s nevýrazným reliéfem. Pro automatické přiřazení bodů z jednoho a druhého obrázku do páru je nezbytné, aby buď přímo povrch byl natolik různorodý, že metody zpracování obrazu toto přiřazení mohou bezpečně a spolehlivě provést, nebo lze na povrch promítat strukturované světlo, které s identifikací pomůže. Otázka měřitelné paralaxy je klíčová pro stanovení rozsahu vzdáleností a prostorové členitosti objektů, ve kterém jsou stereoskopické metody použitelné.

Jiný způsob měření prostorového tvaru tělesa je založen na projekci pravidelné mřížky o známých vlastnostech na povrch studovaného objektu. Prostorové členění povrchu způsobí deformaci mřížky, jež je napřed zaznamenána a pak vyhodnocena. Odchylka mezi očekávanou polohou a skutečně zaznamenanou polohou částí promítaného obrazce je úměrná vzdálenosti daného místa od zvolené roviny. Projekci mřížky je blízká technika využívající jev moaré. Původně bylo moaré označení pro jemnou, obvykle hedvábnou tkaninu s pravouhlým uspořádáním vláken, jež je utkána takovým způsobem, že mezery mezi rovnoběžnými vlákny přibližně odpovídají jejich průměrům. Když člověk hledí na světlé pozadí přes

vrstvy takovéto látky přeložené přes sebe, pozoruje vlnící se pruhy světlejších a tmavších oblastí, které odpovídají tomu, zda v daném místě jsou vlákna obou látek uspořádána za sebou, nebo vedle sebe. Je-li mezi fotoaparát, šikmo dopadající světlo a pozorovaný objekt vložena mřížka (tvořená neprůhlednými proužky na skle, přičemž mezery mezi proužky odpovídají jejich šířce), potom ve snímku pořízeném fotoaparátem lze pozorovat kombinaci mřížky s její projekcí na povrch objektu, výsledný efekt se projevuje soustavou proužků určujících místa o stejné výškové souřadnici.

Laserová profilometrie využívá takzvanou triangulační metodu, při které je laserový paprsek nasměrován svisle na objekt. Obraz stopy paprsku na povrchu tělesa se přes optickou soustavu promítá na lineární pole detektorů. Ze známé geometrie snímacího prvku s maximem signálu a čočky optické soustavy lze s velkou přesností stanovit vzdálenost mezi bodem povrchu a měřicím zařízením. Jestliže se toto uspořádání mnohokrát fyzicky opakuje v jednom zařízení, můžeme hovořit o naměření výškového profilu ve stanoveném úseku. Pokud dále zajistíme vzájemný posun tělesa a záznamového zařízení, můžeme hovořit o laserové profilometrii povrchu tělesa.

Je ovšem možné použít počítačovou tomografii, která vytvoří na základě rentgenových radiogramů získaných z různých směrů prozáření jeho prostorový model i s detailní znalostí jeho vnitřní struktury. Počítačová tomografie je schopná vytvořit z jednotlivých radiogramů plně prostorový model zkoumaného objektu, ale může se také soustředit jen na jeho povrch a jako výstup poskytnout jen „plášť“ vybraného objektu.

## Fotometrické stereo

V rámci dlouhodobého rozvoje různých optických metod pro dokumentaci těles ve 3D je v ÚTAM rozpracovávána metoda fotometrického sterea. Jak název vypovídá, jedná se o metodu, která zjišťuje prostorový tvar tělesa na základě měření intenzity světla odraženého z jeho povrchu. Metoda fotometrického sterea má své kořeny v planetární astronomii, kde byla užita ke zkoumání tvaru kráterových valů na Měsíci, Marsu i jiných planetách. To má své hluboké důvody – jiné metody prostorové digitalizace povrchů těles by nepřinesly požadované výsledky, jelikož výška reliéfu těchto útvarů je zanedbatelná ve srovnání se vzdáleností mezi Zemí a zkoumaným tělesem. Srovnáme-li například výšku kráterů na Měsíci s jeho velikostí, jeví se Měsíc bezmála hladký jako kulečnicková koule. Pro fotometrické stereo však vzdálenost není problém: rozhodující je prokreslení a zřetelnost stínů na povrchu vržených terénem od slunečního záření. A tuto citlivost si zachovává i metoda vyvinutá pro dokumentaci tvaru těles.

Dříve, než bude popsáno provedení a výsledky této techniky pro digitalizaci objektů, je na místě provést malou odbočku, která uvede do vztahu lidské vnímání prostorovosti předmětů a fotometrické stereo. Ukazuje se totiž, že stereoskopické vnímání předmětů díky páru očí s rovnoběžnými osami není jedinou technikou využívanou lidským mozkem pro rozpoznání prostorovosti objektů, což je významná přednost, berou-li se do úvahy výše zmíněná omezení: například ztráta citlivosti vůči hloubce předmětu s jeho vzdáleností. Pro určení tvaru vzdálených předmětů jsou zrakem a myslí nevědomky uplatňovány tytéž fotometrické principy. Díky stínování povrchu tělesa dopadajícím světlem je lidské oko schopno určit jeho tvar, neboť vychází z předpokladu, že zjasněná místa jsou ke zdroji světla

přivrácená, tmavá místa jsou naopak od něj odkloněná. Skok v rozložení jasu je příznakem zlomu nebo hrany. Fotometrický princip je klíčem i k dalším jevům. Například šrafování a rýhování jsou technikami, jak dodatečným vnesením vysokého kontrastu mezi blízkými místy na povrchu zakrýt různorodou barevnost plochy a hlavně její nerovnosti, které vyniknou při tečném osvětlení. I situace, ve kterých selhává využití tohoto principu, jsou potvrzením jeho platnosti: Pokud sochu pokryje krusta neboli souvislá vrstva černých usazenin, které dříve pocházely ze spalování uhlí v lokálních topeništích, a dnes je především způsobuje nákladní doprava s dieselvými motory, stane se její povrch silně pohlcující pro dopadající světlo. Malý zlomek dopadajícího světla, co se z povrchu odrazí, již lidskému oku nestačí k rozpoznání tvaru objektu, a proto ztratí schopnost „číst“ ze stínování objemovost sochy, jež tak ztratí významnou část svého sdělení a zbude z ní pouhá silueta. Tato situace je bezesporu impulzem pro zahájení restauračního procesu, ale to by bylo jiné téma.

Jak tedy metoda fotometrického sterea funguje? Předměty pohlcují, propouštějí a odrážejí dopadající světlo. V odraženém světle je přítomna informace o barevnosti jejich povrchu (která je určena různou odrazivostí pro různé barvy), ale také informace o tvarování, drsnosti a reliéfní členitosti povrchu. „Fotometrická“ se nazývá proto, že stanovuje množství světla, které do záznamového zařízení, například fotoaparátu, z daného místa zkoumaného povrchu přichází. Pro záznam tvaru, ono „stereo“ z názvu se uplatňuje základní pravidlo říkající, že při jinak stejných podmínkách se místo na povrchu jeví nejsvětlejší, míří-li jeho normála (kolmice k povrchu) ke zdroji světla. Ze známé polohy světla lze na základě zjištění, jak světlé se místo na povrchu tělesa jeví, určit jeho sklon napřed vůči tomuto dopadajícímu světlu a potom vůči obecné soustavě souřadnic (Horn 1975 a Woodham 1980). Od znalosti sklonů je již malý krok k dopočtení výšek, které je nezbytné znát pro vytvoření třírozměrného modelu povrchu. Tento „malý krok“ ve skutečnosti představuje řešení obrovské nelineární soustavy rovnic, které jsou schovány „pod kapotou“ aplikace, do které vstupují fotografie nasvětleného povrchu tělesa a ze které jako výsledek vychází rekonstrukce topografie tělesa. Minimální počet vstupních fotografií vyplývá z následující podmínky: jelikož každé místo zkoumaného povrchu je určeno sklonem do dvou směrů a vlastní barevností, je nezbytné využít alespoň tří rozličných způsobů nasvětlení povrchu pro jednoznačné řešení problému. Tento prostorový model se následně „povlékne“ fotografií povrchu pořízenou v rozptýleném bílém světle potlačujícím stíny. Možnost uchovat třírozměrný povrch včetně jeho přirozeného vzhledu je například oproti laserové profilometrii výraznou předností této techniky.

## **Zařízení pro fotometrické stereo**

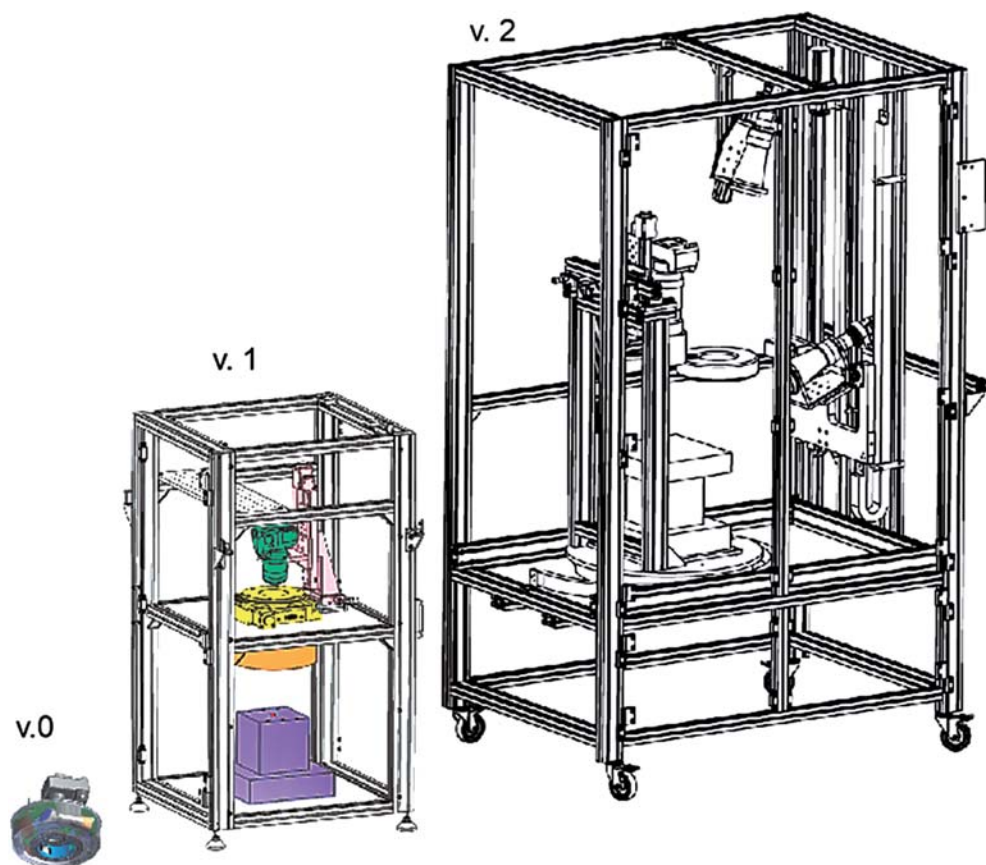
Přesně definované osvětlení předmětu je pro fungování metody rozhodující. Proto bylo v ÚTAM nejprve vyvinuto speciální zařízení, které integruje nasvícení povrchu s jeho záznamem na digitální fotoaparát, jež díky přímému propojení s počítačem umožňuje využití techniky nejen v laboratoři, ale díky kompaktním rozměrům i v terénu, toto zařízení lze označit jako nultou generaci. Zařízení používá další malý trik, aby překonalo omezení postupnosti přepínání světel, které jinak brání záznamu v čase se rychle měnících povrchů: jak známo, většina digitálních fotoaparátů ukládá barevné snímky jako kombinaci červené, zelené a modré složky. Pokud pro každé ze tří světel, které potřebujeme pro vytvoření

3D modelu povrchu, provedeme snímek v jedné z těchto barev, bude zaznamenaný obraz obsahovat tři nezávislé, oddělitelné scény. Tato varianta metody se nazývá „kódované fotometrické stereo“ (označované CPS), protože je možné v jednom snímku zaznamenat tři obrázky najednou, aniž by se ovlivňovaly (Valach 2011 a Vavřík et al. 2005). Zařízení na digitalizaci objektů metodou fotometrického sterea prošla v průběhu času evolucí, kterou vykresluje **obrázek 244**. Původní nasvěcovací zařízení pro CPS bylo použito pro základ zařízení rozšířené o skříň a několik počítačově řízených polohovacích os. Toto rozšířené zařízení je možné označit jako první generaci přístroje. Tímto způsobem bylo možné získat větší počet snímků pro digitalizaci povrchu tělesa a provést celkovou automatizaci záznamu. Nicméně velikost digitalizované plochy nedostačovala pro většinu studovaných předmětů a bylo nutné hledat způsob, jak zvětšit osvětlenou plochu. K tomuto účelu byla využita telecentrická světla, která díky své optické soustavě čoček vydávají kolimované světlo tvořené rovnoběžnými paprsky. Další vylepšení požadované na základě rozboru fungování zařízení první generace spočívalo v přidání pohyblivosti světla, která zaručuje volbu úhlu, pod kterým světlo na vzorek dopadá. Tento stupeň volnosti je pro fungování metody nezbytný – digitalizované předměty s velmi členitým povrchem je třeba osvětlovat téměř svisle, aby se vyloučily vlastní stíny, zatímco předměty s plochým a nevýrazným reliéfem vyžadují bezmála tečné osvětlení, ve kterém vynikají jejich výškové rozdíly. Pro první odhad topografie studovaného předmětu slouží světlo, které na povrch objektu promítá soustavu rovnoběžných proužků. Analýzou proužkového obrazce lze při známé geometrii projekce zjistit absolutní informace o výškové souřadnici v daném místě a tato informace poslouží pro zpřesnění konečné rekonstrukce spojením s topografickými informacemi z fotometrického sterea. Kvalitní prstencové světlo pro bezstínové osvětlení objektu je nezbytnou podmínkou pro kvalitní rekonstrukce, ale také pro dokumentaci objektů. Použití bílého světla zajišťuje spolehlivé chování zařízení při libovolné vlastní barvě zkoumaného objektu na rozdíl od nulté verze zařízení, které povrch nasvěcovalo v různých barvách. Vysoký stupeň automatizace ovládání a možnost programovatelné obsluhy a postupů podle zvoleného algoritmu nabízí novou kvalitu ovládání, jež s sebou přináší i novou kvalitu zaznamenaných dat. V neposlední řadě velká plocha stolku umožňuje i dávkové zpracování digitalizace malých objektů, které na stolek mohou být umístěny současně, a ovládání programu umožní jejich postupnou digitalizaci a spojování neboli „sešívání“ částečných modelů. Výsledný objekt s texturou (vlastní barevností) zaznamenanou s použitím prstencového bezstínového světla a informací o prostorové modelaci získané fotometrickým stereem je potom zcela připraven pro umístování do aplikací umožňujících simulované nasvěcování ve „virtuálních světech“, manipulaci ve virtuální realitě a další operace.

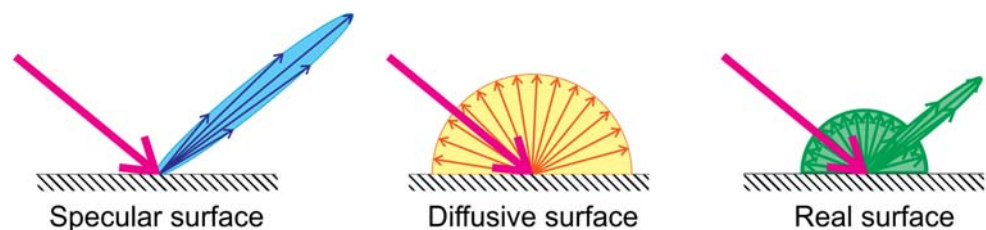
Zmíněná vylepšení byla základem pro v současnosti poslední verzi zařízení.

## Vliv povrchu objektu na spolehlivost fotometrického sterea

Znalost odrazivých vlastností povrchu je zásadní pro fotometrické metody, jelikož svazuje informaci o množství odraženého světla se sklonem plošky vůči dopadajícímu světlu a vůči fotoaparátu (**obr. 245**). Některé povrchy jsou zrcadlově lesklé neboli spekulární, jiné matné (difuzní) a rozptylují dopadající světlo rovnoměrně do všech směrů. Difuzním povrchům se také říká lambertovské. Jiné jsou „něčím mezi“ nebo na přechodu od zrcadlového

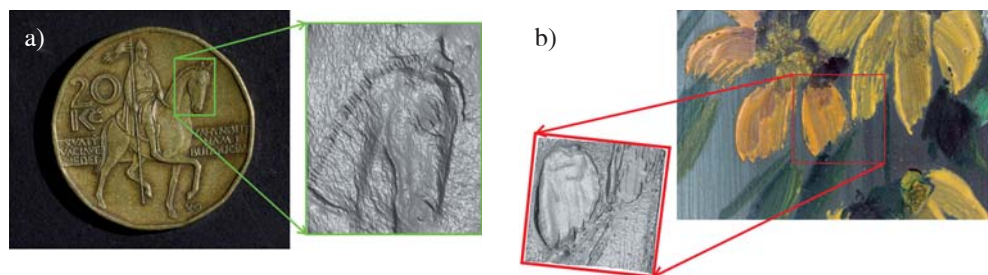


OBRÁZEK 244: Generační sled zařízení na digitalizaci objektů metodou fotometrického stera

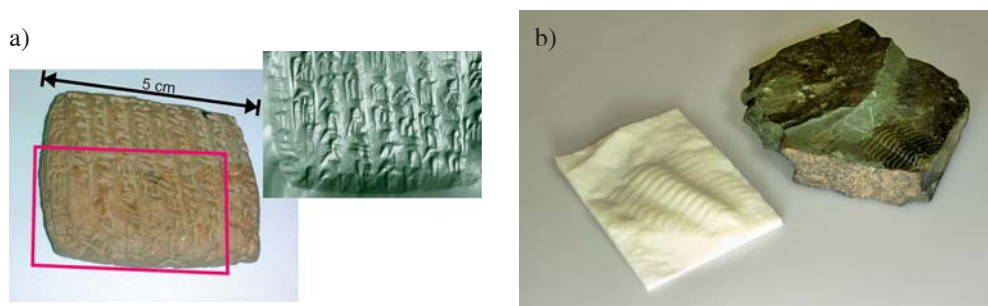


OBRÁZEK 245: Způsob interakce světla s rozdílnými typy povrchů: lesklý (specular), matný (diffusive) a skutečný (real)

lesku k difuznímu povrchu, jak lze například pozorovat u mincí, které jsou různou dobu v oběhu: nové se lesknou, ale vlivem korozivního prostředí lidských rukou, hromaděním škrábanců a abrazí povrchu při směně zmatní (obr. 246). Měřením směrové závislosti odrazivých vlastností tedy lze nejen zpřesnit výpočet povrchového reliéfu, ale také získat poznatky důležité pro vyhodnocení stavu povrchu. Směrovou závislost odrazivých vlastností



**OBRÁZEK 246:** a) Ilustrace digitalizovaného detailu hlavy koně z 20 Kč mince. b) Plastické tahy štětce v malbě vyniknou při virtuálním nasvícení digitalizovaného modelu bočním světlem



**OBRÁZEK 247:** a) Klínopisná tabulka a její digitální model; b) Fosílie trilobite (vpravo) byla digitalizovaná pomocí fotometrického sterea a model použit jako předloha pro 3D tiskárnu, která vytiskla repliku

Lze stanovit pomocí zařízení zvaného reflektometr. Připojením znalostí o odrazivosti povrchu předmětu ke vstupním datům v podobě fotografií v různých nasvíceních lze zpřesnit vypočtenou topografií povrchu tělesa. Začleněním ne-Lambertovských povrchů do procedur fotometrického sterea se významně rozšířila třída materiálů, na které je možné korektně postup aplikovat. Omezení na difuzní povrchy bylo překonáno a nyní lze zahrnout do výpočtu i objekty lesklé nebo s matným leskem. Současně se vytvořil prostor pro možnou synergii aplikačních výstupů s projektem zaměřeným na studium povrchu ochranných povrchů mozaik, jehož jedním z aplikačních výstupů byl laboratorní reflektometr, tedy zařízení schopné získávat potřebná vstupní data o odrazivosti povrchu pro rekonstruování povrchu.

## Využití fotometrického sterea

Schopnost metody zaznamenávat mikroskopické nerovnosti povrchu ji činí přitažlivou pro různé aplikace v oblasti kulturního dědictví. Pro prostorově členité povrchy s malými výškovými rozdíly je možné zintenzivnit prokreslení stínů snížením světla do téměř tečné polohy. Postup se tak podobá známému způsobu, jak hledat na rovné podlaze malý předmět: zhasne se světlo a položenou baterkou se svítí do všech možných směrů. Když kužel světla dopadne na vystupující předmět, vržený stín prozradí jeho polohu. Tímto způsobem lze dokumentovat nárůst degradovaných vrstev – například koroze, nebo naopak různé typy ztráty hmoty z povrchu, například otěrem, v důsledku mechanického čištění a podobně.

Metoda je vhodná zejména pro záznam drobných sbírkových předmětů reliéfního charakteru, jako jsou mince, pečeti, kameje, různé fosílie a podobně. S úspěchem lze fotometrické stereo také uplatnit ve studiu malířských technik různých autorů, protože dokumentuje plastické použití barev pro expresivnější vyznění díla či prostě zaznamenává temperament tvůrce samotného...

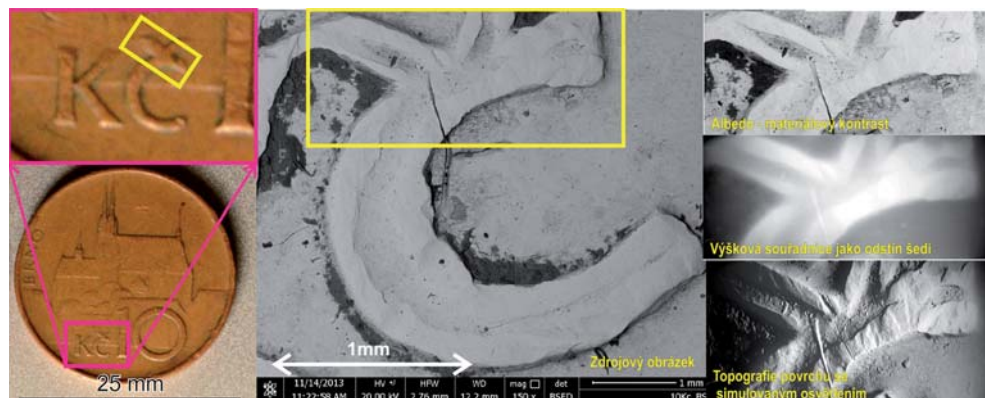
Velmi zajímavé je využití metody pro uchování a celosvětové zpřístupnění sbírek klínopisných tabulek. Klínopis byl ve starověkých kulturách Asie používán k záznamu jak literárních děl, tak i obchodních smluv. Do trojbokého tvaru seříznutým rákosem byly do měkké tabulky z keramické hlíny zapisovány znaky, které se vypálením staly trvalé. Tabulky jsou jednobarevné a čitelnost znaků obstarává stín, který na vrypech vzniká. Tabulka se znaky klínového písma se tedy čte tak, že se různě naklání vůči dopadajícímu světlu a plasticita znaků vyvstává v pohybu stínů. S ohledem na vzácnost destiček není možné je vystavovat riziku přímé manipulace, a proto se hledají způsoby, jak je zpřístupnit badatelům virtuálně, například přes internet. Ukazuje se, že fotografie pro takový účel nedostačují, protože se v nich ztrácí výše popsaný pohyb stínů, ale vytváření digitálních modelů metodou fotometrického sterea by řešením být mohlo...

Jiná výrazná aplikace digitálních třírozměrných modelů těles spočívá v tzv. reverzním inženýrství, kdy jeden výrobce vytváří doplňky, příslušenství nebo náhradní díly k výrobku jiného výrobce, aniž by měl k dispozici originální výkresovou dokumentaci. V jistém slova smyslu do této kategorie spadá i situace, kdy se mají vytvářet ortopedické a protetické pomůcky – dlahy, krunýře na rovnání páteře, umělý chrup nebo části kostí pacientů. V případě muzejních předmětů jde především o doplnění chybějících částí pro názornější předvedení celku (**obr. 247**).

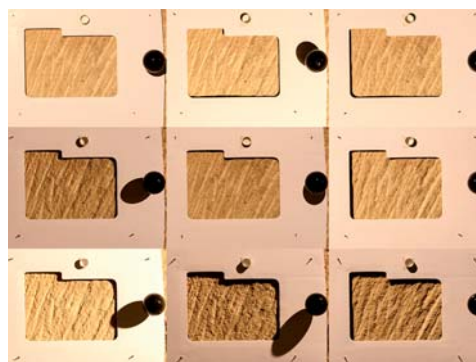
Jak vyplývá z výkladu o historických počátcích fotometrického sterea v astronomii, jeden a týž algoritmus pro 3D digitalizaci předmětů je schopen obsáhnout měřítka astronomická i lidská. Je zajímavé, že stejnou techniku lze použít i pro mikroskopická pozorování, pokud je zaručena možnost „nasvícení“ scény podle pravidel standardního použití metody. Zdroj světla nemusí být pouze viditelné záření, ale může jím být elektronový paprsek či tepelné záření (ve kterém se jeví povrchy lesklejší, protože vlnová délka tepelného záření těles, ve které je povrch pozorován, je delší ve vztahu k nerovnostem povrchu, což je podmínka pro to, aby se povrch jevil opticky hladší). Změnou vlnové délky se lze soustředit na různé úrovně drsnosti povrchu. Tvrzení je ilustrováno prostorovou rekonstrukcí malého detailu mince provedené pomocí řádkovacího elektronového mikroskopu vybaveného čtyřdílným detektorem zpětně odražených elektronů. Záznam obrazů téže části povrchu mince různými kvadranty detektoru je ekvivalentní pořizování snímků při různém nasvícení scény, jak ukazuje schematický **obrázek 248**. Zpracováním vstupních obrázků vyvinutým programem je možné zjistit nejen výškové souřadnice jednotlivých míst zkoumaného povrchu, tedy lokální topografii, ale také zvýraznit materiálový kontrast sledovaného povrchu.

Podobně lze postupovat i pro objekty tak veliké, že se nevejdou do zařízení. Reliéfní povrchy jsou typickou oblastí pro využití fotometrické metody (**obr. 249**). Ta se proto může významně uplatnit při dokumentaci tesařských a kamenických značek, které bývají během historických průzkumů středověkých staveb nejen důležitým zdrojem informací o mistrech, kteří dané dílo provedli, ale i o způsobu, nástrojích a technice práce. Pro studium stop tohoto druhu se obvykle užívá název trasologie.

Použitím velmi silného zdroje světla (nutného k tomu, aby běžné osvětlení povrchu denním světlem bylo zanedbatelné), umístovaného do různých míst, vznikaly nasvícené scény, ze kterých byla provedena rekonstrukce povrchové topografie. Pozornější pohled na detail záberu zkoumané části kamenného bloku ukazuje nejen výrazné vystínování, ale také ozřej-



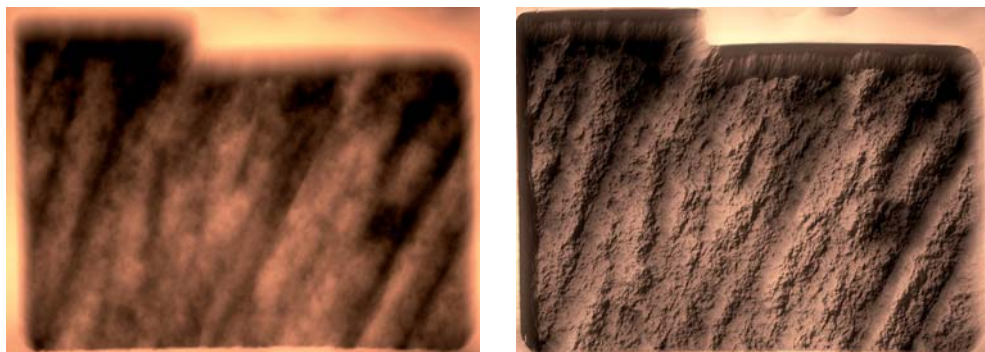
**OBRÁZEK 248:** Fotometrické stereo lze použít k vytváření digitálních modelů i velmi malých objektů (detail mince) zaznamenaných do obrazů pořizovaných fyzikálně odlišným způsobem, než je světelná fotografie – zde pomocí SEM. Výsledek pak ukazuje nejen prostorové členění, ale také materiálové složení.



**OBRÁZEK 249:** Vlevo ukázka získávání vstupních obrázků pro metodu fotometrického stereo „v terénu“. Vpravo kompozice devíti obrázků zachycujících různé nasvícení povrchu, které jsou vstupními daty pro fotometrické stereo

muje několik různých způsobů, jak určovat polohu zdroje světla vůči vzorku a vůči fotoaparátu. Nejjednodušší a nejspolehlivější se jeví použití černé koule, v jejímž povrchu se zdroj světla jeví jako světlá tečka, ale takové řešení není příliš přesné, a proto byla tato indikace ještě doplněna jinou – založenou na stínu vrženém nízkým prstencem a především délkou stínů čtveřice hrotů o známé výšce vystupujících z plochy bílého kartonu. Jak dramaticky odlišný se jeví povrch při různých směrech nasvícení ukazuje **obrázek 250**. Je zároveň přesvědčivou ilustrací skutečnosti, že pro vystižení povrchu je fotografie nedostatečná a měla by být doplněna informací o topografii a o orientacích plošek povrchu. Takovou informaci poskytne právě digitalizace povrchu předmětu, například provedená fotometrickým stereem. Jejím výsledkem je poznání výškové informace o jednotlivých bodech na povrchu, ale také možnost podle potřeby provést simulované nasvícení povrchu i s virtuálně vrženými stíny. Výškové informace jsou zakódovány do barevného odstínu bodů v jednotlivých místech na povrchu studovaného tělesa. Oproti tomu přidáním simulovaného světelného zdroje se zviditelní díky vrženým stínům modelace povrchu.





**OBRAZEK 250:** Vlevo digitální model povrchu kamene – jas jednotlivých bodů odpovídá jejich výškové souřadnici. Vpravo též model doplněný „virtuálním světlem“, které vržením stínů činí prostorové členění povrchu názornější

Vysvětlení principů, na kterých je metoda fotometrického sterea založena, odhaluje zajímavé souvislosti metody s fyziologií lidského vnímání objemovosti těles. Na příkladech rekonstrukcí povrchů různých typů těles byly ukázány možnosti metody fotometrického sterea pro digitalizaci objektů. Výsledné virtuální kopie mohou být bez omezení sdíleny se zájemci, ať už jimi jsou badatelé, nebo jen nadšení laici. Digitální modely mohou být též replikovány na 3D tiskárnách a tím lze nepřímo přispět k ochraně předlohy.

## Poděkování

Kapitola využívá výsledků výzkumu podporovaného v rámci projektu NAKI „Diagnostika poškození a životnosti objektů kulturního dědictví“ DF11P01OVV001. Bez spolupráce s J. Bryscejnem, D. Vrbou, D. Vavříkem, T. Fílou a dalšími spolupracovníky by nemohla být dokončena.

## Použitá literatura

- Holubová, B., Z. Zlámalová Cílová, I. Kučerová a M. Zlámal. Weatherability of hybrid organic–inorganic silica protective coatings on glass. *Progress in Organic Coatings*, 2015, 88, 172-180. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2015.07.001>
- Valach, J. a J. Bryscejn. Improved precision of stereometric measurement of relief's surface by means of structured light enhanced photometric stereo method. In: Návrat, T., V. Fuis, L. Houfek a M. Vlček (eds.). *Experimentální analýza napětí 2011*. Brno: Czech Society for Mechanics, 2011, 411-415. ISBN 978-80-214-4275-7.
- Vavřík, D., J. Bryscejn, J. Jakůbek, a J. Valach. Optical measurement of a 3D displacement field using one camera. In: Brebbia, C. A. (ed.) *Computational Methods and Experiments in Material Characterisation II*. Southampton: WIT Press, 2005, 229-237. ISBN 978-1-84564-031-6. <https://doi.org/10.2495/MC050221>
- Winston, P. H. (ed.). *The psychology of computer vision*. New York: McGraw-Hill, 1975, 115-155.
- Woodham, R. J. Photometric method for determining surface orientation from multiple images. *Optical Engineering*. 1980, 19(1), 139-144. <https://doi.org/10.1117/12.7972479>