

URČOVÁNÍ OPTICKÝCH VLASTNOSTÍ POVRCHŮ PRO ÚČELY OCHRANY OBJEKTŮ KULTURNÍHO DĚDICTVÍ

Vladimír Kocour, Jaroslav Valach

Shrnutí: *Tento příspěvek prezentuje jednoduchou metodu měření odrazivosti povrchu. Odrazivost povrchu je určující charakteristikou pro provádění rekonstrukcí topografie povrchu na základě optických metod založených na fotometrických principech. Tyto metody jsou využívány například pro posuzování degradace povrchů historických stavebních památek. Prezentovaná metoda užitím jednoduchých výpočetních procedur efektivně zpracovává rozsáhlé objemy dat z optického měření, výsledkem je detailní popis vztahu mezi množstvím světla odraženého z povrchu a úhly pozorování a nasvícení. V závěru je diskutován způsob plné instrumentace měření a zpracování dat i využití výsledků ve fotometrické technice rekonstrukce prostorového tvaru povrchu.*

Klíčová slova: *povrch, odrazivost, fotometrie*

1 Motivace

Množství informací přítomných ve vizuálním projevu povrchu přitahuje pozornost mnoha výzkumníků. Naše vidění, v souladu s našimi předchozími zkušenostmi, se v průběhu evoluce stalo mimořádně citlivým nástrojem k hodnocení kvality povrchů předmětů ale také nástrojem rozpoznávajícím prostorové tvarování těles. Všechny tyto informace jsou zakódovány ve způsobu, jakým světlo interaguje s povrchem studovaného objektu. Náš mozek provádí všechny tyto výpočtové velice náročné operace ve zlomku sekundy, avšak teprve v posledních desetiletích umožnilo neustálé zvyšování výkonu počítačů, aby naše přirozené schopnosti byly deterministicky reprodukovány stroji. Jedním z příkladů strojového zpracování a vyhodnocení obrazu jsou fotometrické metody rekonstrukce topografie povrchu (tj. získání dat popisujících souřadnice bodů na povrchu). Fotometrické metody jsou závislé na přesné znalosti odrazivosti povrchu. Ovšem odrazivostní funkce může být požadovanou informací nebo může sloužit jako nezbytný parametr v jiných aplikacích, a proto je důležité vytvořit rychlou a účinnou experimentální techniku jejího zjišťování.

2 Fotometrické stereo

Světlo odražené od povrchu může být využito k určení jeho topografie. Narozdíl od jiných optických rekonstrukcí 3D (nebo lépe řečeno 2,5D, protože odražené světlo většinou neobsahuje informaci o vnitřní struktuře předmětu), které jsou většinou závislé na paralaxe sloužící k výpočtu topografie povrchu a úhlu, ze kterého objekt snímáme, fotometrické metody jsou nezávislé na vzdálenosti rekonstruovaného objektu. Fotometrická metoda je v ÚTAM vyvíjena především za účelem dokumentace a studia objektů kulturního dědictví, jako např. klínopisných tabulek, povrchu těsnících výplní, apod. Fotometrickou metodu lze použít i pro studium mechanických vlastností materiálů v průběhu jejich deformace [2]. Fotometrické stereo nebo také metoda získávání „tvaru ze stínování“, je technika pro digitální rekonstrukci topografie povrchu, založená na znalosti relativní světlosti nebo tmavosti bodů povrchu při určitém známém osvětlení [3]. Ve fotometrickém stereu se většinou používá funkce odrazivosti založená na lambertovském modelu, představující ideálně matný povrch.

Lambertovský model však neodpovídá vždy přesně skutečnosti. Je-li povrch studovaného objektu příliš odlišný od lambertovského, zrekonstruovaná topografie je sice přesná v detailu, ale odlišná od skutečnosti ve větším měřítku.

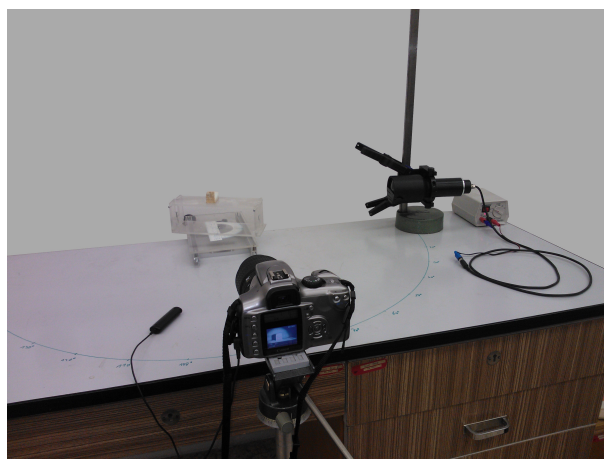
3 Optické vlastnosti povrchů

Každý povrch, který není dokonale vyleštěný (obvykle považujeme dokonale vyleštěný povrch za opticky hladký) odráží světlo nejen ve směru definovaném zákonem odrazu, ale i do jiných směrů. Studujeme-li intenzitu odraženého světla, nevystačíme si se zákonem odrazu: „velikost úhlu dopadu se rovná velikosti úhlu odrazu“. Při šikmém dopadu a odrazu přirozeného (tj. nepolarizovaného a časově nekoherentního) světla od povrchu objektu dochází také k částečné polarizaci odraženého světla. Světlo se rozkládá po odrazu na dvě rovinné polarizované vlny, které označujeme písmeny s a p . Polarizace s a p jsou definovány společnou rovinou dopadajícího a odraženého paprsku. Vlna, jejíž vektor elektrické intenzity kmitá v rovině kolmé na rovinu dopadu, se nazývá s -vlna. Vlna, jejíž vektor elektrické intenzity kmitá v rovině dopadu, se nazývá p -vlna. Vlna s polarizací s se odráží obecně s jiným koeficientem odrazivosti, než vlna s polarizací p . Měříme-li úhel dopadu φ od kolmice, odrazivost R roste pro s -vlnu, ale průběh odrazivosti pro p -vlnu je komplikovanější. Odrazivost nejprve klesá, a potom roste. Lidské oko stejně jako fotografický film, fotonásobič nebo CCD kamera je kvadratický detektor: vnímá jen amplitudu, nikoli fázi optické vlny, a neregistruje ani polarizaci. Rozdílná závislost koeficientu odrazivosti pro s -vlnu a pro p -vlnu však má vliv na celkovou intenzitu odraženého světla detekovaného kvadratickým detektorem.

Opak hladkého, dokonale vyleštěného povrchu, je dokonale matný povrch. Idealizovaný, dokonale matný povrch nazýváme lambertovský. Pro lambertovský povrch s konstantním koeficientem odrazivosti ρ platí $R \sim \cos \varphi$, kde R je odrazivost lambertovského povrchu a φ je úhel dopadu světla. Odrazivost R je nezávislá na úhlu odrazu ε . Skutečný matný povrch je lambertovský jen přibližně.

Optické vlastnosti povrchu mohou odhalit informaci o stavu materiálu: ztráta lesku a nárůst drsnosti povrchu umělé hmoty ukazují na její degradaci. Přechod od zrcadlového lesku k difúzní odrazivosti poukazuje na vznik zkorodované nebo zoxidované vrstvy. Postupný pokles odrazivosti může signalizovat znečištěné prostředí, a právě takovému je vystaveno například zdivo nebo kámen. Například lidská pokožka je částečně průsvitná, zatímco vrstva make-upu nikoli, a to způsobuje nápadný rozdíl mezi nimi.

4 Současný stav: laboratorní model



Obr 1: Experimentální sestava na měření odrazivosti povrchu

Vytvořili jsme improvizované zařízení pro měření intenzity odraženého světla $L' = R L$ v závislosti na úhlu dopadu φ a úhlu odrazu ε (viz obrázek 1). Zařízení se skládá z kolimovaného světelného zdroje (LED lampy), měřeného vzorku a z fotoaparátu (digitální zrcadlovky). Zařízení slouží k zjištění, jak se reálný povrch chová. Digitální zrcadlovka není ideální detektor, protože jeho čip má antiblooming. Antiblooming je technické opatření proti iradiaci příliš intenzivním světelným tokem; avšak antiblooming zhoršuje linearitu

odezvy čipu na světelný tok. Přesto digitální zrcadlovka poskytla nějaké použitelné výsledky. Použili jsme fotoaparát Canon EOS 300D, citlivost 100 ISO. Expoziční čas 1 s. Pro přesnější měření budeme potřebovat fotometrickou CCD kameru bez antibloomingu a s lineární odezvou.

5 Zpracování dat

Data v podobě fotografií povrchu jsou načtena do skriptu příkazů v jazyce MATLAB, který představuje ideální vývojové prostředí pro práci s obrázky, manipulaci s nimi jako rozsáhlými maticemi čísel a pro vizualizace výsledků. V současné době je využíváno grafické rozhraní k manuálnímu výběru části obrazu odpovídajícímu studovanému povrchu, v blízké budoucnosti bude tato činnost automatizována.

6 Předběžné výsledky

Měřili jsme několik druhů povrchů: hladký vyleštěný kov, drsný kovový povrch, kovový povrch zoxidovaný po vyleštění a fotometrický standard, který by měl být lambertovský. Kromě hladkého (zrcadlového) a drsného (v ideálním případě lambertovského) povrchu existuje ještě jeden důležitý typ povrchu – retroreflektivní povrch, který ovšem studován nebyl. Retroreflektivní povrch je takový povrch, který odráží dopadající světlo zpátky do zdroje. Tento povrch by odrazil nejvíce světla do směru $\varphi = -\varepsilon$. Ideální retroreflektor je koutový odrazeč (neuvažujeme-li určité posunutí odraženého paprsku). Retroreflektor lze realizovat také povrchem tvořeným malými skleněnými kuličkami nebo kovovým povrchem tvořeným dutými kulovými ploškami. Retroreflektivní povrch má široké uplatnění v dopravním značení.

Shrnutí měření ukazuje obrázek 2: fotometrický standardní povrch (blízký lambertovskému) (Obr. 2a), povrch oboustranné lepicí pásky (Obr. 2b), hladký kovový povrch (Obr. 2c), dva typy oxidovaného kovového povrchu (Obr. 2d a 2e) a drsný kovový povrch (Obr. 2f). Úhel dopadu φ je na vodorovné ose od -40° do $+80^\circ$, úhel odrazu ε je na svislé ose od -40° do $+60^\circ$. Ne všechny kombinace úhlů bylo možné měřit. Intenzita odraženého světla L' je vyjádřena barevně: tmavě modrá je nejnižší, červená je nejvyšší intenzita. Dvě oddělená maxima na obrázcích 2b, 2c a 2f jsou způsobena vlivem polarizace na intenzitu odraženého světla.

Z obrázků je vidět, že tato experimentální sestava je schopna dobře rozlišit hladký a drsný povrch. Také stupeň oxidace je možné touto metodou měřit.

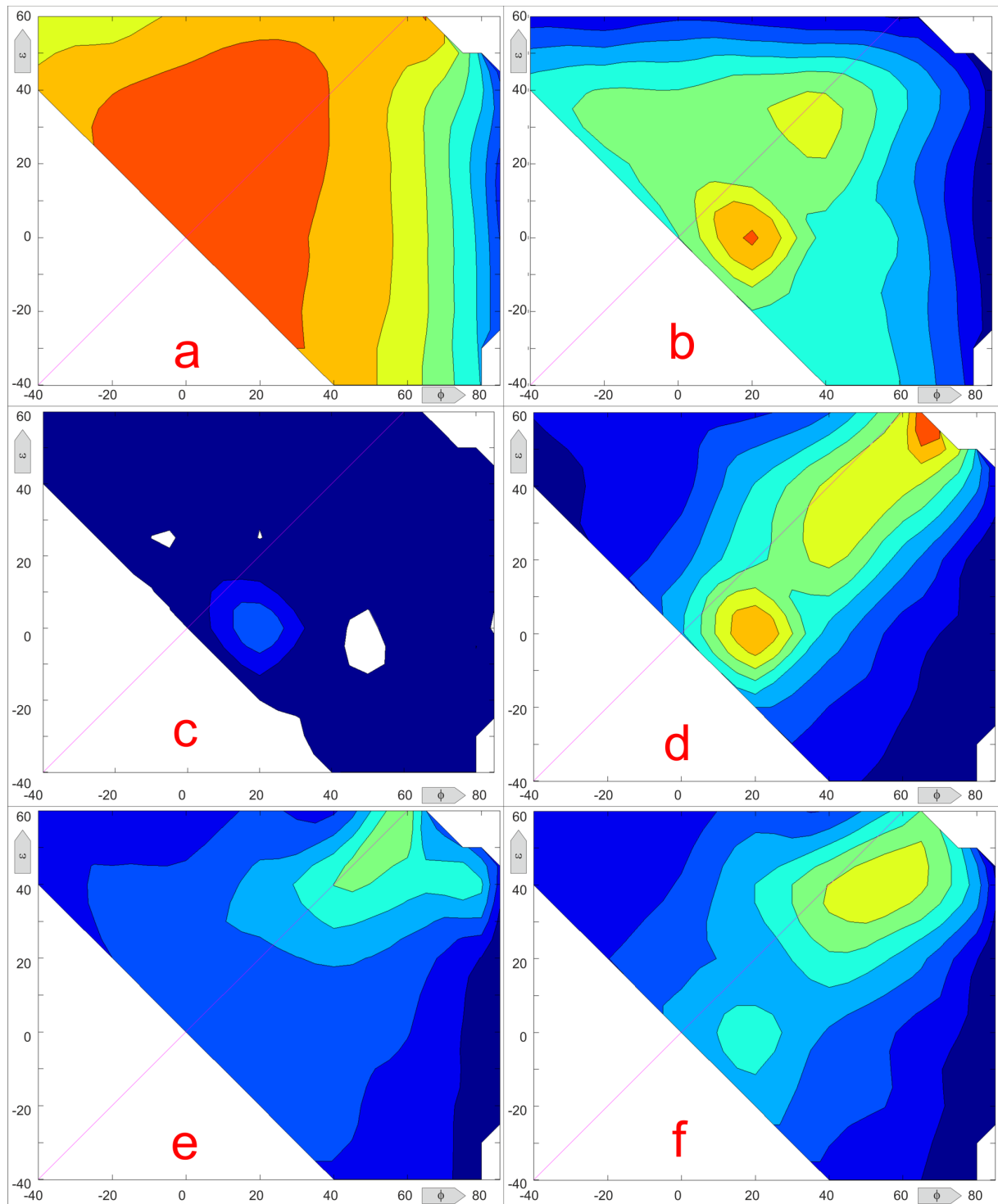
7 Závěry a směr budoucí práce

Bylo ukázáno, že je možné měřit odrazivost povrchů s použitím velmi jednoduchého vybavení, a že je možné s ním také detekovat hlavní vlastnosti povrchu. Můžeme měřit stupeň degradace prostřednictvím změn charakteru povrchu z hlediska odrazivosti.

Co se týče dalšího vývoje techniky, můžeme následovat obvyklou cestu specializovaných laboratoří. V nich se používají dva hlavní druhy přístrojů zvaných gonioreflektometry. První typ je založený na podobném přístupu, jaký jsme zvolili, druhý typ využívá objektivu typu rybí oko a snímá světlo odražené do všech směrů najednou [4]. Nejprve nahradíme digitální zrcadlovku fotometrickou černobílou kamerou doplněnou případně barevnými filtry. Zařízení bude ovládáno krokovými motory a řízeno počítačem.

Poděkování

Tento výzkum je podporován projekty Ministerstva kultury České republiky #DF11P01OVV001 a #DF12P01OVV017.



Reference

- [1] HECHT, E.: *Optics*, Addison Wesley, San Francisco 2002, 4th edition, ISBN 0-321-18878-0
- [2] Vavrik, D., Bryscejn, J., Jakubek, J. and Valach, J.: "Optical measurement of 3D displacement field using one camera", in *Computational Methods and Experiments in Material Characterisation II*, (Wit Press, Southampton, UK, 2005), 51, pp. 229-237, 1-84564-031-4, 1746-4471
- [3] Horn, B. K. P.: "Obtaining shape from shading information", in *The Psychology of Computer Vision* (McGraw Hill, NY, 1975), pp. 115-155. 978-0070710481.
- [4] Ward, G.J.: "Measuring and modeling anisotropic reflection", *Computer Graphics (ACM)*. Vol. 26, no. 2, pp. 265-272. 1992