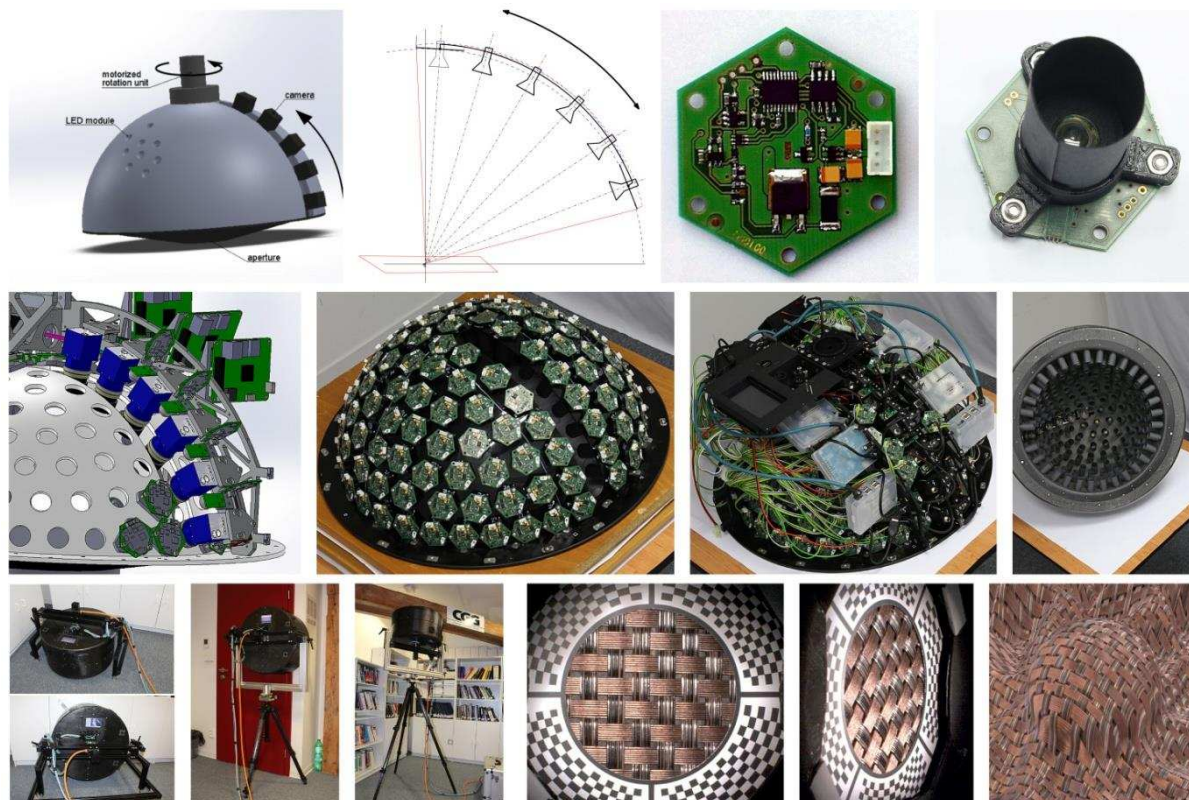


Přenosné zařízení pro měření směrové odrazivosti povrchů

Vlastimil Havran, Jan Hošek, Šárka Němcová, Jiří Čáp a Jiří Bittner
Fakulta elektrotechnická a fakulta strojní, ČVUT v Praze



Ve spolupráci týmů z Fakulty elektrotechnické ČVUT v Praze, katedry počítačové grafiky a interakce a Fakulty strojní ČVUT v Praze, ústavu přístrojové a řídicí techniky bylo vyvinuto unikátní přenosné zařízení pro měření prostorově proměnné dvousměrové funkce odrazivosti povrchů pro účely využití dat změřených povrchů pro vizualizaci v počítačové grafice, virtuální realitě, počítačovém vidění apod. Vizuální vjem povrchu je obecně závislý na spektru a směru osvětlení a směru pozorování daného povrchu. Kvantifikace těchto dat pro jeden bod povrchu je reprezentována funkcí dvousměrného rozdělení (dvousměrové charakteristiky) odrazivosti povrchu (*bidirectional reflectance distribution function* — BRDF) pro jednu vlnovou délku a směry odpovídají bodům na povrchu hemisféry. Pětirozměrná BRDF však nedokáže zachytit informace o textuře povrchu, případně povrchových a podpovrchových jevech interakce světla s materiálem, které mají často zásadní vliv na odrazivost a tedy i vzhled povrchu daného materiálu. Proto se BRDF, určená pro jeden bod povrchu, rozšiřuje na 2D dvousměrovou texturní funkci (*bidirectional texture function* — BTF) povrchu, sedmiparametrovou charakteristiku. BTF je měřená jako diskretní funkce a odpovídá mnoha tisícům snímků povrchu, kde každý snímek povrchu je pořízen pod jiným směrem osvětlení a jiným směrem pohledu na měřený povrch. BTF data mají uplatnění zejména v počítačové grafice, kdy změřený reálný povrch je natažen na povrch digitálně vytvořených 3D objektů. Tím získá vzhled virtuálních 3D objektů mnohem realističtější podobu, a to při pohledu z libovolného směru a pro různá simulovaná osvětlení. Změřená BTF data tak mají široké uplatnění ve vytváření vizualizací jak ve virtuální tak i rozšířené realitě, například filmových tricích či návrhových fázích (CAD/CAM) budoucích výrobků, tak i v celé řadě dalších oborů, například v digitalizaci a 3D prohlížení uměleckých děl nebo v kontrole kvality povrchových úprav, které se do současnosti prováděly pouze kvalitativně zkušenným okem.

Efektivní měření BTF dat představuje technickou výzvu, kdy je potřeba měřený povrch zvolené velikosti rychle nasnímat v řádově desítkách tisíc kombinací směru osvětlení a pohledu. Navrhli a realizovali jsme technické zařízení, které umožňuje měřit BTF data ve velmi krátkém čase cca 15 minut s rychlostí měření 1000 snímků s vysokým dynamickým rozsahem za minutu. Navíc konstrukce měřícího zařízení umožňuje nejen jeho snadnou přenositelnost, ale lze získat BTF měřených povrchů mimo laboratoř a to i v terénu, například v industriálním prostředí nebo v přírodě. V tomto případě je možné zařízení instalovat přímo u měřeného (lokálně rovinného povrchu) v libovolné poloze, na rozdíl od předchozích řešení, která vyžadovala extrakci vzorku z prostředí, přenos vzorku do laboratoře a často zdlouhavé laboratorní měření trvající řádově jednotky hodin.

Koncept a konstrukce přenosného zařízení pro BTF měření povrchů byly motivovány požadavky (a) zkrácením doby nutné pro získání souboru tisíců snímků povrchu na dobu řádově minut, (b) přenosností celého zařízení a měřením vzorků v jejich přirozeném prostředí bez nutnosti jejich extrakce, (c) dosažením dostatečného prostorového rozlišení měřených dat pro potřeby jejich využití v počítačové grafice a (d) dostatečnou robustností celého zařízení zaručující jeho funkčnost i při realizaci měření mimo laboratorní podmínky. Těmto cílům byla

přizpůsobena jak mechanicko-optická konstrukce zařízení, tak i jeho elektronické vybavení, a následně i software pro měření, přenos a zpracování velkého objemu získaných BTF dat.

Pro realizaci navrženého zařízení byly použity nejnovější technické komponenty i netradiční postupy a moderní technologie. Základní komponentu představuje kamera pro záznam měřených dat. Kvůli rychlosti snímání a přenosu dat je zařízení vybaveno šesti rychlými USB 3.0 kamerami s Bayerovým filtrem umístěné v meridiální rovině nad vzorkem. Společným polohováním těchto kamer je možné získat najednou šest snímků vzorku pod zvolenými úhly v rozsahu od kolmého pohledu ($\theta = 0^\circ$) až po pohled odpovídající úhlu od kolmice 75° (elevační úhel k rovině povrchu 15°). Osvětlení vzorku je realizováno miniaturními osvětlovacími moduly, které jsou vybaveny LED zdroji se spektrální charakteristikou umožňující co nejněvčetnější trichromatické měření. Celkem 134 těchto osvětlovacích modulů je rozmístěno na části kulové plochy (realizované jako skořápka z PMMA) se středem nad měřeným vzorkem. Skořápka z PMMA a mechanismus polohování 6 kamer jsou spojeny pomocí vnitřního nosného rámu umožňující rotaci celého systému nad měřeným povrchem. Tato úhlová poloha v rozsahu 0 až 360 stupňů je nastavována pomocí servopohonu s harmonickou převodovkou. Nastavení elevačního úhlu šestice kamer je realizováno pomocí krokového motoru a krátkého lineárního vedení realizující přibližný kruhový pohyb v rozsahu $12,5^\circ$, kdy dvě sousední kamery mohou snímat vzorek pod stejným úhlem v krajních polohách jejich pohybu. Nastavení celého zařízení vůči vzorku je realizováno pomocí justážních pohybů dvou variant externích stativů s kolmostí kontrolovanou pomocí vnitřního laserového autokolimátoru.

BTF data měřeného vzorku jsou snímána najednou šestici kamer pracujícím v rozlišení 1040×776 pixelů a vysokém dynamickém rozsahu (*high dynamic range* — HDR). Každý uložený HDR snímek je sestaven ze čtyř snímků o různé expozici, což je nezbytné, neboť měřená data mají velký dynamický rozsah. Ovládaní kamer a kompozice snímků do výsledného HDR snímku je realizováno na šesti mikropočítačích připojených ke kamerám. Tyto mikropočítače jsou připojeny k hlavnímu mikropočítači řídícímu celé měření, který ovládá jednotlivé osvětlovací LED moduly, polohování kamer pomocí krokového motoru a servopohonu, laserový autokolimátor a umožňuje náhled z kamer na dotykovém displeji. Mikropočítače jsou propojeny pomocí lokální sběrnice Ethernet s použitím vestavného přepínače i k externímu datovému úložišti, kam se ukládají změřená BTF data povrchu k dalšímu zpracování. Celý realizovaný přenosný měřicí systém má hmotnost 15 kg a je připojen pomocí tří kabelů k externímu elektrickému zdroji o hmotnosti 10 kg.

Realizovaný přenosný měřicí systém je první světově realizované zařízení, které umožňuje nastavení své polohy vůči planárnímu pevnému vzorku v prostoru a tedy provádět terénní měření. Měřený vzorek může mít tvar kruhu o průměru 51 mm nebo čtverce o hraně 36×36 mm a lze jej měřit s rozlišením 150 DPI případně 300 DPI. Zařízení umí nastavit a pořídit snímek vzorku pod libovolným azimutovým úhlem v rozsahu 0 až 360° okolo normálové osy a 0 až 75° ve směru od normály povrchu. Pro realizaci BTF měření je potřeba zvolit konkrétní nastavení. Praktické nastavení je například 20 úhlových poloh ve směru rotace okolo vzorku a dvě polohy šestice kamer, tedy celkem 12 úhlů od kolmice vzorku v rozsahu 4° až 75° . To reprezentuje 120 směrů pohledů na vzorek s průměrnou směrovou vzdáleností $10,1^\circ \pm 3,3^\circ$ a zorným úhlem kamery $11,4^\circ$. Průměrná úhlová vzdálenost 139 osvětlovacích LED modulů umístěných na otočném hemisférickém skeletu včetně 5 LED modulů umístěných mezi kamerami je $11,1^\circ \pm 0,5^\circ$. Pro zvolenou kombinaci 139 směrů osvětlení a 120 směrů pohledu ke vzorku lze získat během měření za 17 minut celkem 16680 HDR snímků vzorku (cca 40 GB dat).

Naměřená BTF data je nezbytné radiometricky i barevně kalibrovat a nadále softwarově zpracovat pro jejich další využití v aplikacích. K tomuto účelu je povrch vzorku snímán spolu s částí svého okolí, kde jsou umístěny plošky usnadňující následující zpracování dat. Ty jsou pokryty černým a bílým difúzním kalibračním materiálem se známou hodnotou odrazivosti. Pro geometrickou kalibraci byla navržena kalibrační značka ve formě kovové samolepky s asymetrickou radiální šachovnicí o rozměrech 85×85 mm a vnitřním otvorem průměru 51 mm pro povrch vzorku. Samolepka s kalibračním vzorem se upevňuje na vybranou část měřeného lokálně rovinného povrchu vzorku. Snímek vzorku včetně části kalibrační značky umožňuje zarovnání jednotlivých snímků s přesností lepší než $1/4$ pixelu a reprojekci pro ortografickou kameru ve směru normály ke vzorku pro všechny změřené snímky. To si vyžádalo realizaci pokročilého algoritmu zpracování obrazu.

Koncept, části návrhu, fotografie celého zařízení, některých vnitřních částí včetně osvětlovacího modulu, situační polohy měření vzorku v terénu a aplikaci měřených dat na virtuální 3D objekt jsou zobrazeny na obrázku. Pro čtyři situační polohy měření vzorku byly zkonstruovány dva typy stativů vybavené šesti justážními prvky. První je zemní rám umožňující měření vzorku na zemi nebo v malé výšce nad zemí. Druhý je trojnohý robustní stativ s U-rámem, který umožňuje měření vzorků na stěně ve větších výškách a na stropě. Měřicí systém je možné instalovat a zprovoznit kdekoli, kde je průchozí rozměr alespoň 600 mm.

Podrobné informace o výzkumu a přenosném zařízení pro měření odrazivosti povrchu, jenž byl spolufinancován GAČR projektem GA14-19213S a který je nezbytným předpokladem pro digitální průmysl nadcházejícího období, lze nalézt v [1, 2] a na webové stránce <http://dcgi.fel.cvut.cz/projects/lightdrum>.

[1] Jan Hošek, Vlastimil Havran, Šárka Němcová, Jiří Bittner, a Jiří Čáp. 2017. *Optomechanical design of a portable compact bidirectional texture function measurement instrument*. Appl. Opt. 56, 4 (Feb 2017), 1183–1193. DOI: <http://dx.doi.org/10.1364/AO.56.001183>

[2] Vlastimil Havran, Jan Hošek, Šárka Němcová, Jiří Čáp, and Jiří Bittner, 2017. *Lightdrum – Portable Light Stage for Accurate BTF Measurement on Site*. Sensors 2017, 17(3), 423; <http://dx.doi.org/10.3390/s17030423>