

STUDIUM KOREKCE K NEROVNOMĚRNÉMU ROZLOŽENÍ DOPADAJÍCÍ INTENZITY SVĚTLA VE FOTOMETRICKÉM STEREU

David Vrba, Jaroslav Valach

Ústav teoretické a aplikované mechaniky AV ČR, v. v. i.

Abstrakt

Příspěvek ukazuje možnost, jak v prostředí Matlab vyhodnotit míru zlepšení měření 3D topografie povrchu tělesa založeného na optické metodě nazývané fotometrické stereo. Tato metoda nepoužívá běžné triangulační techniky používané jinými optickými metodami k zjištění povrchu tělesa, a proto nepotřebuje dvě, ale jen jednu kameru. Využívá skutečnost, že intenzita odraženého světla u dokonale matného povrchu závisí na úhlu mezi normálou k povrchu a směrem, ze kterého dopadá světlo. Máme-li k dispozici alespoň tři zdroje světla, jejichž směrové vektory neleží ve stejné rovině, můžeme z odražené intenzity světla určit normálu k povrchu v daném bodě. Ze znalosti normál ve všech bodech je možné integrální metodou zrekonstruovat 3D povrch studovaného tělesa. V naší práci bereme v úvahu nerovnoběžnost světelných paprsků dopadajícího světla způsobenou konečnou vzdáleností bodového zdroje a studujeme vliv nerovnoměrného osvětlení na výslednou rekonstrukci.

1 Metoda fotometrického sterea

Pro Lambertovský (nebo-li dokonale difúzní) povrch platí tzv. kosinový zákon. Intenzita odraženého světla I je přímo úměrná kosinu úhlu, který svírá normála k povrchu \vec{n} se směrem, ze kterého dopadá světlo \vec{S} ,

$$I = \rho \vec{S} \cdot \vec{n}, \quad (1)$$

kde ρ je albedo. Pokud máme alespoň tři fotografie zkoumaného povrchu, dostáváme pro každý pixel fotografie soustavu tří rovnic, kterou můžeme zapsat maticově

$$I = \rho S \vec{n}, \quad (2)$$

kde I je sloupcový vektor, jehož složky jsou rovny hodnotám zaznamenané intenzity odraženého světla na fotografiích, S je matice, jejíž řádky jsou jednotkové vektory určující směr, ze kterého dopadá světlo a \vec{n} je normála k povrchu. V případě, že jsou vektory v matici S nezávislé (tj. na každé fotografii je povrch nasvícen z jiného směru), můžeme tuto rovnici invertovat a vypočítat normálu k povrchu v daném bodě [1]

$$\rho \vec{n} = S^{-1} I, \quad \rho = |S^{-1} I|, \quad \vec{n} = \frac{S^{-1} I}{\rho}. \quad (3)$$

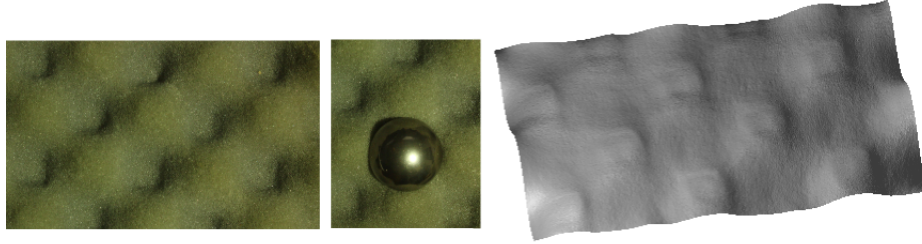
Na obrázku 1 je znázorněna ideální situace třech fotografií kužele s dokonale difúzním povrchem a jeho následná rekonstrukce pomocí Frankot-Chellappova algoritmu [2].

Na obrázku 2 je znázorněna rekonstrukce reálného povrchu. V tomto případě nebyly známy přesné polohy světelných zdrojů. K určení vektorů \vec{S} byl použit odraz světla v kuličce, která je znázorněna na prostředním obrázku. Rekonstrukce se prováděla z celkem 17 fotografií. V případě, kdy jsou k dispozici více než tři fotografie, není již matice S čtvercová a první vztah v rovnici (3) přejde na rovnici

$$\rho \vec{n} = I^T S (S^T S)^{-1}. \quad (4)$$



Obrázek 1: Tři fotografie kužele a jeho rekonstrukce. Na každé fotografii je kužel osvětlen z jiného směru. Fotografie jsou vytvořeny v rendrovacím softwaru POV-Ray.



Obrázek 2: Vlevo je jedna ze 17 fotografií reálného povrchu. Směry dopadajícího světla jsou určovány pomocí odrazu světla v kuličce. Na obrázku vpravo je znázorněna výsledná rekonstrukce.

2 Barevné fotometrické stereo

Barevné fotometrické stereo je metoda, u které dochází k rekonstrukci povrchu teoreticky pouze z jedné fotografie. Studovaný povrch je osvětlen třemi světly současně, každý zdroj ale vyzařuje světlo jiné barvy. Pro odraženou intenzitu v daném bodě potom dostáváme [3]

$$I_i = \sum_{j=1}^m \vec{S}_j \cdot \vec{n} \int E_j(\lambda) R(x, y) Q_i d\lambda, \quad (5)$$

kde index i nabývá hodnot r, g, b a označuje o jakou složku odražené intezity se jedná (intezita odraženého světla je na barevné fotografii zaznamenána ve třech složkách R, G, B), index j označuje zdroj světla, $E(\lambda)$ je spektrální rozložení světla, $R(x, y)$ je funkce popisující odrazivost povrchu, Q je veličina, která charakterizuje citlivost senzoru ve fotoaparátu a λ je vlnová délka světla. Soustavu rovnic (5) je možné přepsat

$$\begin{aligned} I_r &= \vec{S}_r \cdot \vec{n} \rho_r I_{0r}^1 + \vec{S}_g \cdot \vec{n} \rho_g I_{0r}^2 + \vec{S}_b \cdot \vec{n} \rho_b I_{0r}^3 \\ I_g &= \vec{S}_r \cdot \vec{n} \rho_r I_{0g}^1 + \vec{S}_g \cdot \vec{n} \rho_g I_{0g}^2 + \vec{S}_b \cdot \vec{n} \rho_b I_{0g}^3 \\ I_b &= \vec{S}_r \cdot \vec{n} \rho_r I_{0b}^1 + \vec{S}_g \cdot \vec{n} \rho_g I_{0b}^2 + \vec{S}_b \cdot \vec{n} \rho_b I_{0b}^3, \end{aligned} \quad (6)$$

kde jsme integrál z rovnic (5) označili jako ρI_0 a ρ_r, ρ_g, ρ_b označuje postupně červenou, zelenou a modrou složku vlastní barvy povrchu, I_{0m}^n označuje m -tou složku dopadající intenzity n -tého světla. Soustavu rovnic (6) je možné přepsat maticově

$$\begin{bmatrix} I_r \\ I_g \\ I_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{0r}^1 & I_{0r}^2 & I_{0r}^3 \\ I_{0g}^1 & I_{0g}^2 & I_{0g}^3 \\ I_{0b}^1 & I_{0b}^2 & I_{0b}^3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \rho_r & 0 & 0 \\ 0 & \rho_g & 0 \\ 0 & 0 & \rho_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_r^1 & S_r^2 & S_r^3 \\ S_g^1 & S_g^2 & S_g^3 \\ S_b^1 & S_b^2 & S_b^3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ n_3 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

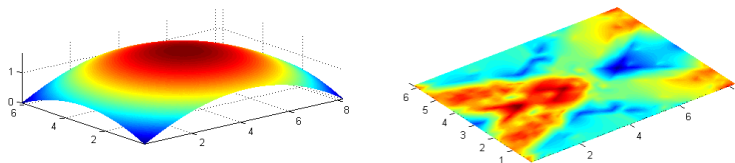
dostáváme tedy

$$\vec{I} = I_0 \rho S \vec{n}. \quad (8)$$

Používáme-li pouze červené, zelené a modré světlo, je matice I_0 diagonální.

3 Odchyly od ideálního modelu

Rovnice (1) vychází z předpokladu, že zdroj světla je bodový a je od studovaného předmětu nekonečně vzdálený. Tato situace v praxi není splněna, což vede k tomu, že paprsky světla nejsou rovnoběžné a dopadají na jednotlivé body zkoumaného povrchu pod jiným úhlem a s jinou intenzitou. Různé body předmětu jsou také od zdroje různě vzdáleny. To vede k tomu, že v rovnici (8) jsou prvky v matici S a I_0 obecně funkcemi polohy. Tuto situaci je možné řešit tak, že matici I_0 získáme z kalibrace, provedeme-li nejprve nasvícení povrchu o známé topografii. Jelikož se soustava rovnic (7) řeší pro každý bod povrchu zvlášť, je možné vektory v matici S určit v každém bodě znovu. Na obrázku 3 je provedena rekonstrukce roviny nasvícené současně červeným, zeleným a modrým světlem. Vlevo je vidět výsledek rekonstrukce, když se předpokládá, že matice I_0 a S nezávisí na poloze. Na obrázku vpravo je výsledek rekonstrukce po započítání korekcí.



Obrázek 3: Rekonstrukce roviny bez započítání korekce a s korekcí (viz text).

4 Závěr

V naší práci studujeme možnosti rekonstrukce povrchu metodou fotometrického sterea v prostředí Matlab. Na základě srovnání výsledků se známou předlohou je možné zpětně určit nejvýhodnější podmínky pro uplatnění metody a započítat korekce pro potlačení vlivů, které úpravami odstranit nelze. Optimalizovaný postup fotometrické rekonstrukce povrchu bude využit jako softwarová komponenta specializovaného zařízení určeného ke studiu povrchů sbírkových předmětů vyvíjeného projektem "Diagnostika poškození a životnosti objektů kulturního dědictví".

5 Poděkování

Tato práce vznikla za laskavé podpory Ministerstva kultury ČR v rámci projektu #DF11P01OVV001 "Diagnostika poškození a životnosti objektů kulturního dědictví".

Reference

- [1] R. J. Woodham, *Photometric method for determining surface orientation from multiple images*. Optical Engineering, 19, 139-144, 1980.
- [2] R. T. Frankot, R. Chellappa, *A method for enforcing integrability in shape from shading algorithms*. IEEE Transactions on pattern Analysis and Machine Intelligence, 10, 439-451, 1988.
- [3] M. Drew, M. Brill, *Color from Shape from Color: A Simple Formalism with Known Light Sources*. J. Optical Am. Soc. A, 17, 1371-1381, 2000.

David Vrba
vrba.dave@gmail.com

Jaroslav Valach
valach@itam.cas.cz