

Fényképek utólagos megvilágítása

Vass Gergely
gergely_vass@siggraph.org
www.vassg.hu

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi egyetem

Összefoglaló

A dolgozatban egy egyszerű módszer kerül bemutatásra, amely lehetővé teszi a fotókon látható tárgyak utólagos megvilágítását. A kiszámított új megvilágítás a tárgy minden látható pontjához tartozó normál vektor meghatározásán alapszik. A normál vektor iránya néhány speciális fényviszonyok között rögzített kép segítségével történik.

1. Bevezető

Gyakran felmerülő probléma a 3D grafikusok körében, hogy a különböző programok segítségével kiszámolt fotorealistikus képet a képsztézis ismételt elvégzése nélkül akarják módosítani. Az egyik ilyen tipikus igény a képet létrehozó fények utólagos módosítása. Erre a programok lehetőséget is adnak, hiszen nem csak a kiszámított kép egyes pixeleinek színét tárolják el, hanem opcionálisan az árnyaláshoz szükséges egyéb információkat is. Ezen információk alapján pedig akár egy képfeldolgozó program is ki tudja számítani a megváltozott fényviszonyokhoz tartozó színértékeket.

A számítógépes grafika rohamos fejlődésével egyre nagyobb igény mutatkozik a valós felvételek utólagos módosítására is. Sajnos azonban a valós felvételekből sokkal nehezebb azokat az információkat kinyerni, melyek nélkülözhetetlenek a képek utólagos módosításához. A dolgozatomban arra keresem a választ, hogy mi módon lehet egy valós felvételen látható tárgyat utólag, számítógép segítségével tetszőleges irányból megvilágítani. Vizsgálódásaim során törekedtem arra, hogy az általam javasolt módszer könnyen megvalósítható legyen, és ne tegye szükségessé speciális szoftver kifejlesztését.

2. Felületek árnyalása

A számítógéppel létrehozott fotorealistikus 3D grafika lényege az, hogy olyan képeket generáljunk, melyek a lehető legjobban hasonlítanak a valódi fényképekhez. Mára számos algoritmust ismerünk, melyek valószerűen szimulálják a fény viselkedését és jól használhatóak a virtuális tárgyak

„fényképezésére”. Ezen algoritmusok alapvetően két feladatot oldanak meg:

- *Megpróbálják kiszámítani a virtuális világ fényviszonyait.*
- *A kiszámított fények – sugársűrűség – és a felületek anyagi jellemzői alapján megadják az objektumok pontjainak színét.*

Mivel célunk egy felvételen látható valós tárgy megvilágítása – azaz „kiszínezése” –, foglalkoznunk kell a fenti két problémával. Meg kell mondanunk, hogy pontosan milyen fényrel világítjuk meg a testet és azt, hogy ennek hatására hogyan változik meg a tárgy egy-egy pontjának színe.

2.1 Kiszámított fényviszonyok

A valószerű megvilágítás kiszámítása akkor különösen nehéz feladat, ha figyelembe vesszük a felületek közötti fényvisszaverődéseket, azaz a globális illuminációs problémát próbáljuk megoldani. Mivel vizsgálataink során egy-egy test megvilágításával foglalkozunk felesleges ezt az igen nehéz problémát kezelni. A gyors számítás és az egyszerű megvalósíthatóság érdekében feltételeztem, hogy a felhasználó irányfényekkel világítja meg a felületeket és nem jönnek létre fényvisszaverődések. A fény viselkedésének ilyen egyszerűsítése – azaz a *direkt* vagy *lokális illumináció* használata – nem jelent jelentős minőségi romlást, hiszen a reflexióknak minimális szerepe van ha csak egy tárgy megvilágítását számítjuk ki.

2.2 Színezés

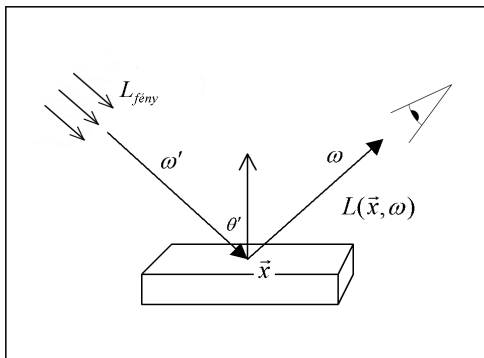
Ha a felhasználó meghatározta a fény irányát és erősségét ki kell számítani, hogy a tárgy éppen megjelenített pontja milyen színű. Ezt alapvetően két megközelítés szerint adhatjuk meg attól függően, hogy milyen adatok állnak a rendelkezésünkre.

A Paul Debevec által javasolt [3] eljárás szerint lehetőségünk van mérni, hogy a tárgy pontjai milyen színűek különböző irányú megvilágítottság mellett. Ha ez az adatbázis a rendelkezésre áll, csak ki kell olvasni az általunk használt fény hatásának megfelelő színértékeket egy táblázatból. Mivel ez a módszer precíziós műszerek használatát feltételezi, ezért nem volt alkalmazható a kutatásban.

Ha nem áll rendelkezésre mért adat a különböző beesési irányú fények hatásáról, lehetőségünk van kiszámolni, hogy milyen színűek lesznek a felület pontjai adott megvilágítás esetén. Ehhez az árnyalási egyenlet [1] egyszerűsített alakját használhatjuk, mely segítségével adott irányfény esetén kiszámítható a szemünkbe jutó fény mennyiség:

$$L(\vec{x}, \omega) = L_{\text{fény}} \cdot f_r(\omega', \vec{x}, \omega) \cdot \cos \theta' \quad (1)$$

ahol $L(\vec{x}, \omega)$ jelöli az x pontból a szem irányába eső fény mennyiségét (sugársűrűség), $L_{\text{fény}}$ az irányfény erősségét, $f_r(\omega', \vec{x}, \omega)$ az anyagi jellemzőt leíró BRDF függvényt (Bidirectional Radiance Distribution Function) és θ' a beeső fény és a felület normál vektora által bezárt szög (1. ábra)



1. ábra: Felület színének meghatározása

A BRDF függvény azt adja meg, hogy adott becsapódási irány esetén a fény mekkora hányada verődik vissza a vizsgált irányba. A számítógépes grafikában több módszer létezik a BRDF függvény megadására és számítására. A legegyszerűbb és a legelterjedtebb az ún. empirikus modellek használata. Ezek a modellek nem mért adatokon alapulnak, hanem egyszerű matematikai összefüggésekkel közelítik a valódi anyagok viselkedését. Vizsgálataim során a kettő legismertebb modellt alkalmaztam a tárgyak megjelenítéséhez, a Phong és a Lambert modellt.

Lambert modell

A Lambert modell a tökéletesen diffúz anyagok viselkedését írja le az azonos nevű törvény alapján. Ebben az esetben a visszavert fénysűrűség független a nézeti iránytól:

$$f_r(\omega', \vec{x}, \omega) = k \quad (2)$$

A Lambert illuminációs modell használata esetén a tárgy színének meghatározásához a felhasználó által megadott konstansokon – diffúz visszaverődési együtthatón és az irányfény erősségén – kívül csupán a fény irányvektora és a normál vektor által bezárt szög szükséges.

Phong modell

Mivel a spekuláris visszaverődés modellezésére alkalmatlan a Lambert modell egy másik illuminációs modellt használunk a csillanások létrehozására. A Phong modell az egyik legkönnyebben számítható modell:

$$f_r(\omega', \vec{x}, \omega) = k_s \cdot (\vec{R} \cdot \vec{\omega})^n / \cos \theta' \quad (3)$$

ahol k_s és n a csillanás erősségét és nagyságát határozza meg, $\vec{\omega}$ a nézeti irányvektor, \vec{R} pedig a fény irányvektorának, ω' -nek a tükörképe a felületi normálisra. A képletből látszik, hogy a Phong modell kiértékeléséhez a konstansokon kívül a felületi normális, a fény irányvektora, és a nézeti vektor szükséges.

3. Szükséges adatok előállítás

A Phong és a Lambert modell kiértékeléséhez olyan adatok ismeretére van szükség, melyek nem feltétlenül állnak rendelkezésünkre. Ezen adatokat vagy a felhasználónak kell meghatározni, vagy a képanyagból kell az információt kinyerni.

Megvilágítás iránya

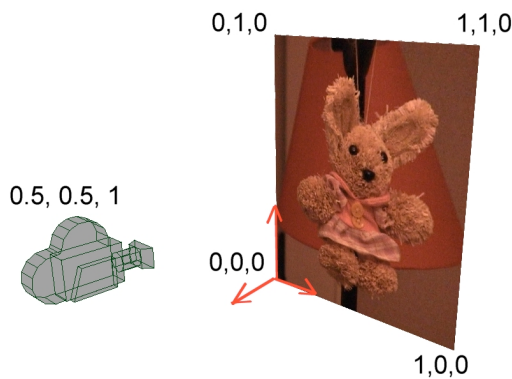
Mivel a lokális illuminációs modellt alkalmazom és csak irányfényeket használok, a megvilágítás iránya egy konstans vektorral jellemezhető, melyet a felhasználó határoz meg.

Nézeti irány

A nézeti irány meghatározása sajnos nem egyértelmű, hiszen a rendelkezésre álló kép nem

tartalmaz a kamera pozíciójára, látószögére vagy torzítására vonatkozó, könnyen kinyerhető információt. A feladat az, hogy a feldolgozandó kép minden egyes pixeléhez meghatározzunk egy irányvektort, mely a kamerából az illető pixel középpontjába néz.

A gyors számítás és az egyszerű implementálhatóság kedvéért feltételeztem, hogy a virtuális kamera torzítás nélküli perspektivikus vetítést valósít meg. A kamera pozícióját szintén önkényesen jelöltem ki, bár ez a számítások megnehezítése nélkül módosítható (2. ábra).



2. ábra: Számításokhoz használt koordináta-rendszerben értelmezett kamera pozíció

Így az egyes pixelekhez a nézeti vektor az alábbi egyszerű alakban számítható:

$$\omega = (x, y, 0) - (0.5, 0.5, 1) \quad (4)$$

A felület normál vektora

A legnehezebb feladat a normál vektor meghatározása. Ha a felhasználó akarná meghatározni minden egyes pixelben a képen látható tárgy felületének normál vektorát, akkor kénytelen lenne a tárgy virtuális mását (a "stand in" objektumot) lemodellezni (pl. egy polygon felület formájában). Egy ilyen modell ismeretében bármelyik 3D szoftvercsomag képes a normál vektorokat kiírni egy külső állományba.

Ez a megközelítés azonban a gyakorlatban a legtrikábban alkalmazható. A javasolt módszer lényege az, hogy a valódi tárgyról készített fotók alapján határozzuk meg a normál vektorokat. Mivel ezek a vektorok szoros kapcsolatban vannak a tárgy felületének alakjával, alapvetően két lehetőség nyílik meghatározásukra:

- Ha valamilyen módon sikerül a test *geometriáját* reprodukálni, a parciális deriváltakból könnyen meghatározhatjuk a normál vektorokat. Ez a megközelítés sajnos számos problémát vet fel. Egy darab állóképből, vagy több, de ugyanazon kameraállásból készült felvételek alapján gyakorlatilag lehetetlen a modell létrehozása. A ma létező összes algoritmus – az ún. image based modelling algoritmusok – több információt igényelnek a geometria reprodukálásához. Ez lehet pl. egy mozgó kamerás kép-szekvencia, sztereo kép vagy különböző irányú metszeti képek. Mivel alapvető célom, hogy a gyakorlatban is könnyen alkalmazható legyen a módszer, ezt a megközelítést elvettem.
- Ha közvetlenül a *normál vektor irányára* szeretnénk következtetni a képből, akkor meg kell vizsgálnunk, hogy mitől is függ a kép egy pixelének intenzitása:

$$I_{x,y} = f(\vec{N}_{x,y}, \omega', \omega_{x,y}, f_{r_{x,y}}, L,) \quad (5)$$

A fenti meglehetősen leegyszerűsített egyenlet szerint *egy darab irányfény esetében* is az (x,y) pixel színe minimum 5 ismeretlentől függ: az illető pontbeli normál vektor, a fény beesési iránya, a nézeti irány, az anyagi jellemző (BRDF függvény) és a fény erőssége. Célunk, hogy olyan képet készítsünk ahol meghatározott körülmények között teljesül, hogy a pixel intenzitása csak az ismeretlen normál vektor iránytól függ:

$$I_{x,y} = f(\vec{N}_{x,y}) \quad (6)$$

úgy, hogy létezik

$$f^{-1}(I_{x,y}) = \vec{N}_{x,y} \quad (7)$$

Ebben az esetben ugyanis a képpontok színei alapján meg tudjuk határozni minden pontban a normál vektort. Ha ezt megtettük, akkor már nincs semmi akadálya, hogy a Phong és a Lambert modell alapján utólag megvilágítsuk a valódi képen látható tárgyat.

4. Normál vektor meghatározása

Annak érdekében, hogy a (6.) összefüggést elő tudjuk állítani - azaz a képpontok színe az ismert paramétereken kívül csak a normál vektortól függjön -

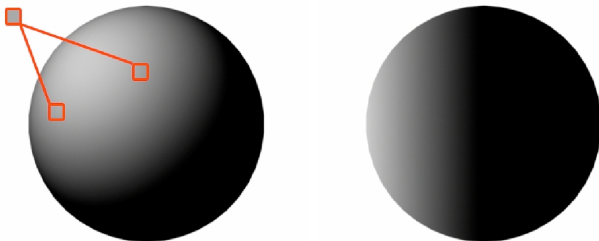
az (5.) összefüggés szabad paramétereit - kivéve a normál vektort - le kell kötni. Ez a feldolgozandó kép készítésére jelent megkötéseket.

4.1 Előfeltételek a felhasznált képekről

A BRDF függvény ismerete az egyik legproblematisabb pont, hiszen ez egy komplex, öt dimenziós függvény. Fényképek alapján csak úgy tudjuk kiszámítani a valódi BRDF-et ha rendelkezésre áll az eredeti környezet geometriai modellje [4]. Vizsgálataimban nem volt módomban a tárgyak anyagi jellemzőinek pontos és egyszerűen megvalósítható mérésére, ezért feltételeztem, hogy a vizsgált tárgyak diffúz anyagok, azaz a Lambert törvénynek megfelelően a visszavert fény független a nézeti vektortól. Ezzel az egyszerűsítéssel két legyet ütöttünk egy csapásra, hiszen így a nézeti vektorra sincs szükség az összefüggésben.

Ha a kép készítéséhez használt fényeket is ismerjük, további két paramétert tudunk lekötni. Mivel feltételeztük, hogy csak egy fényforrás van jelen, már csak ennek irányát és erősségét kell meghatározni. Ha a vizsgált tárgytól elég messzire visszük a fényforrást, akkor irányfénynek tekinthető konstans fényerővel. Így az (5.) összefüggés jobb oldalán csak a normál vektor ismeretlen, a többi paramétert ismerjük.

Hogy pontosan milyen összefüggés van a normál vektor és a képpontok között az még további vizsgálatot igényel, az viszont bizonyos, hogy akármilyen legyen ez a kapcsolat invertálhatónak kell lennie. Sajnos azonban egy, a fenti megkötésekkel készített képen sok olyan azonos színű képpont lehet, melyekhez más-más normál vektor tartozik, azaz sérül az invertálhatóság. Ahhoz, hogy a színértékek és a normál vektor iránya között egy-egyértelmű hozzárendelés legyen, valamilyen speciális irányú megvilágításra lesz szükség.



3. ábra: Ha tetszőleges irányból érkezik a fény, nem tudunk a normál vektor irányára következtetni a pixel színéből. Ha oldalról világítunk a normál vektor horizontális komponensére már tudunk következtetni.

4.2 Speciális megvilágítás

Egy térbeli vektor meghatározása visszavezethető a koordinátarendszerben értelmezett három komponensének meghatározására. Vizsgáljuk meg, hogy egy-egy komponens hogyan nyerhető ki valós fotókból. A számításaim koordinátarendszere szerint értelmezett x, y, z irányok a horizontális, vertikális és mélységi irányoknak felelnek meg.

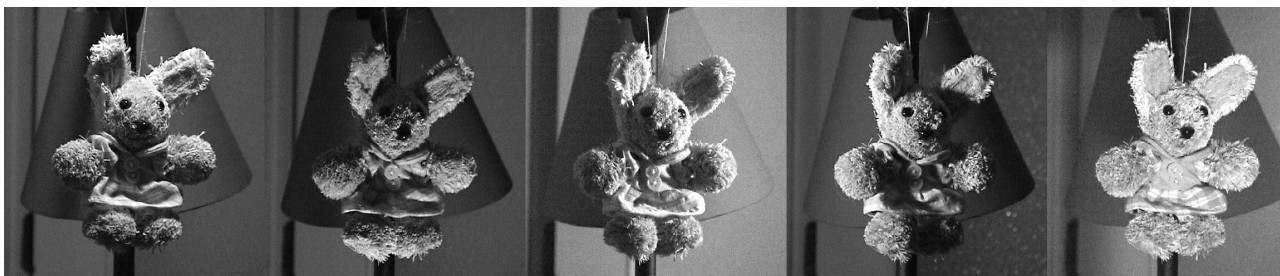
Tekintsük elsőként a horizontális komponenst. A Lambert modell szerint ott lesz a tárgy a legfényesebb, ahol a normál vektor a fény irányába néz. Ennek tükrében úgy tudjuk elkerülni, hogy különböző x komponensű normál vektorokhoz azonos fényesség tartozzon, hogy a fény "jobbról" vagy "balról" világítja meg a tárgyat (3. ábra). Ha ez teljesül, akkor jobb- és baloldali megvilágítás esetén a pozitív ill. negatív x komponensekre következtethetünk a képekből. (1) és (2) alapján ez az összefüggés:

$$L(\vec{x}, \omega) = L_{\text{fény}} \cdot k \cdot \cos \theta' \quad (8)$$

Tegyük fel, hogy a fény jobbról, azaz a pozitív x irányból érkezik. Ebben az esetben a normál vektor és a fény irányának egységvektora által bezárt szög megegyezik a normál vektor és az x tengely által bezárt szöggel. Ennek a szögnek a koszinusza pedig - meglepő módon - pontosan a normál vektor x komponense. Vagyis:

$$L(\vec{x}, \omega) = L_{\text{fény}} \cdot k \cdot \vec{N}_x \quad (9)$$

Ez az *invertálható* összefüggés pedig azt mutatja, hogy a "jobbról" megvilágított Lambert típusú felület fényessége lineáris összefüggésben van a normál vektorának x komponensével. Hasonló módon ha "balról" világítunk a negatív x komponensekre következtethetünk. A vertikális és mélységi irány hasonlóan megkapható. Nyilván a negatív z komponensű normál vektorral rendelkező felületet nem láthatjuk, így a z komponens nagysága lineárisan függ a kamera irányából érkező fény hatására kialakuló fényességgel.



4. ábra: A megadott irányokból érkező fény hatása. Látható, hogy a visszaverődések miatt kis fény más irányból is jön.

5. Gyakorlati alkalmazás

A fent részletezett speciális megvilágítással 5 darab képet kell készítenünk: jobbról (+x), balról (-x), felülről (+y), alulról (-y), szemből (z). Ezen képek segítségével meghatározhatjuk a pixelekhez tartozó normál vektort. Ennek ismeretében a felhasználó által megadott irányfényvel utólag megvilágíthatjuk a valódi, lefotózott tárgyakat Phong ill. Lambert modell segítségével. A gyakorlati megvalósítás nem okoz nehézséget egy általános kompozitáló vagy képfeldolgozó program segítségével, feltéve ha a felhasználónak lehetősége van saját kifejezéseket, un. script-eket vagy expression-öket írni.

5.1 Felvételek elkészítése

Ha lehetőségünk van a tárgyat tetszőleges módon megvilágítani - vagy *nem* megvilágítani - a következő megvilágítás melletti képeket kell elkészíteni: jobboldali, baloldali, felső, alsó és kamera irányú. Természetesen a felhasználó tetszőleges fények mellett – akár természetes megvilágítást használva – további képeket is készíthet a tárgyról. A módszer segítségével a speciális öt kép elegendő egy tetszőleges másik kép utólagos manipulálásához.

Ha a vizsgált tárgyról természetes megvilágításban készítenünk képeket és nincs lehetőségünk a környezet fényeit eliminálni, akkor sincsen probléma. Készítenünk kell képeket a megadott 5 irányból történő megvilágítás mellett, valamint egyet az eredeti, természetes megvilágításban. Ezek különbségét képezve megkapjuk az általunk elhelyezett fények hatását, azaz az öt kívánt képet.

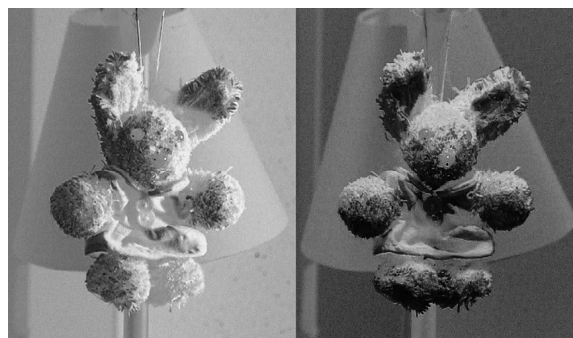
Sajnos elkerülhetetlen, hogy a megvilágított tárgy egyes részei árnyékolva legyenek. Ezeken a területeken a normál vektor irányának korrekt meghatározása nem lehetséges a javasolt módszerrel, így a sok mélyedéssel rendelkező, többnyire konkáv felületek esetében nehézségekbe ütközhetünk.

5.2 Információ kinyerése

A képeket általában elő kell készíteni a feldolgozáshoz. Gondoskodni kell arról, hogy a legvilágosabb pont teljesen fehér, a legsötétebb pedig fekete legyen. Ilyenkor lehetőség van az esetleges hibák csökkentésére, például a szinte mindig létrejövő, nem kívánt irányú fényvisszaverődések hatásának gyengítése révén.

Érdeemes a normál vektor irányát egy képen eltárolni az egyszerű kezelhetőség miatt. Mivel a képfeldolgozó programok nem kezelik a negatív számokat, ezért a következő módszert használtam:

$$(x, y, z) = \left(\frac{J+1-B}{2}, \frac{F+1-L}{2}, \frac{E+1}{2} \right) \quad (10)$$

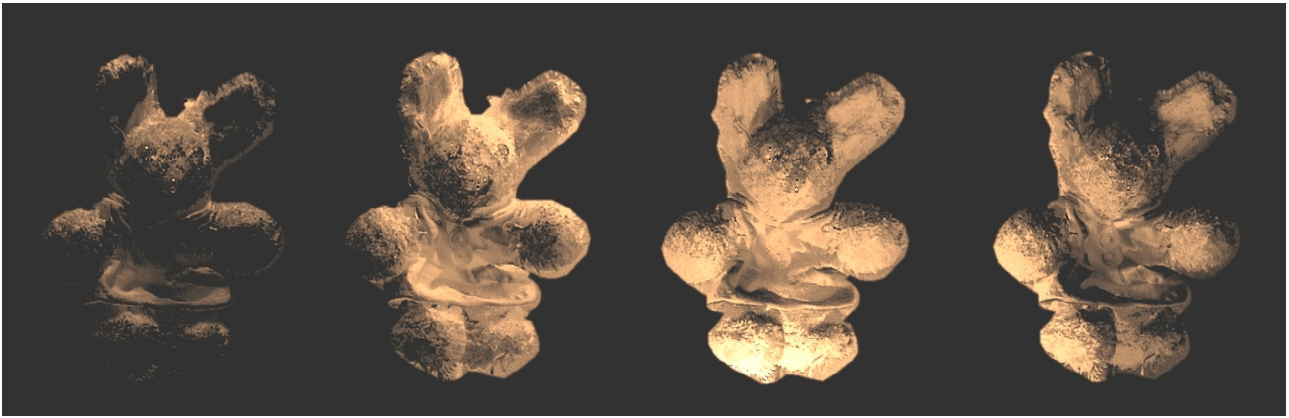


5. ábra: A 10. összefüggés segítségével kiszámított x és y irányú komponensek

ahol x,y,z a kép három színesatornája, J és B a jobb- és baloldali megvilágítással, F és L a fenti- és lenti megvilágítással, E pedig az előlről készült megvilágítással készült kép világossága. Így egy képen eltároltuk a normál vektor irányát úgy, hogy 0 és 1 közötti értékeket használunk.

5.3 Világítás számítása

A normál vektort ismerve már könnyű a Phong és Lambert modell szerinti megvilágítás kiszámítása (1), (2) és (3) alapján. A Lambert modell megvalósítása:



6. ábra: A tárgy utólagos megvilágítása különböző irányokból

$$I = k \cdot \cos \theta' = k \cdot (\vec{N} \cdot \vec{L}) \quad (11)$$

Ahol k a felhasználó által megadott konstans, a koszinusz pedig a normál vektor és a fény vektorának skaláris szorzata. Figyelni kell arra, hogy a számítások során az irányvektorokat normalizálni kell.

A Phong modell számítása valamivel nehezekebb:

$$I = k \cdot \frac{(\vec{R} \cdot \vec{\omega})^r}{\cos \theta'} = q \cdot (\vec{R} \cdot \vec{\omega})^r \quad (12)$$

Ahol q a felhasználó által megadott konstans és R vektor a fény irányvektorának tükörképe a normál vektorra. Ennek kiszámítása igen egyszerű:

$$\vec{R} = \vec{L} - 2 \cdot \vec{N} \cdot (\vec{N} \cdot \vec{L}) \quad (13)$$

A (13) és a (4) összefüggéseket visszahelyettesítve (12)-be az alábbi képletet kapjuk a Phong modell megvalósítására, mely közvetlenül implementálható:

$$I = q \cdot ((\vec{L} - 2 \cdot \vec{N} \cdot (\vec{N} \cdot \vec{L})) \cdot ((x, y, 0) - (0.5, 0.5, 1)))^r \quad (14)$$

6. Összefoglalás

A dolgozatban bemutatott egy igen egyszerű módszert, mely segítségével utólag, kizárólag a képfeldolgozás eszközeivel lehetőség nyílik egy valós felvételen látható tárgy tetszőleges irányból történő megvilágítására. Az eljárás több, speciális fotó elkészítését teszi szükségessé, melyek alapján a felület normál vektorára következtethetünk. Ez általában nem szolgál tökéletesen pontos eredménnyel, de a tesztek alapján használhatónak bizonyult.

Két jelentős probléma merül fel a módszer alkalmazása során. Sajnos a mozgóképek utólagos megvilágítása nem lehetséges a fent részletezett módon. A másik jelentősebb probléma, hogy a tárgy azon részein, ahol jelentős önárnyékolás lép fel rossz eredményt kapunk. Szerencsére a tesztek tanulsága alapján ez a hiba nem szembevető. További fejlesztési lehetőség a képeken látható zaj hatásának csökkentése. Szintén hasznos lehet a normál vektorokból a tárgy geometriájának kiszámítása is.

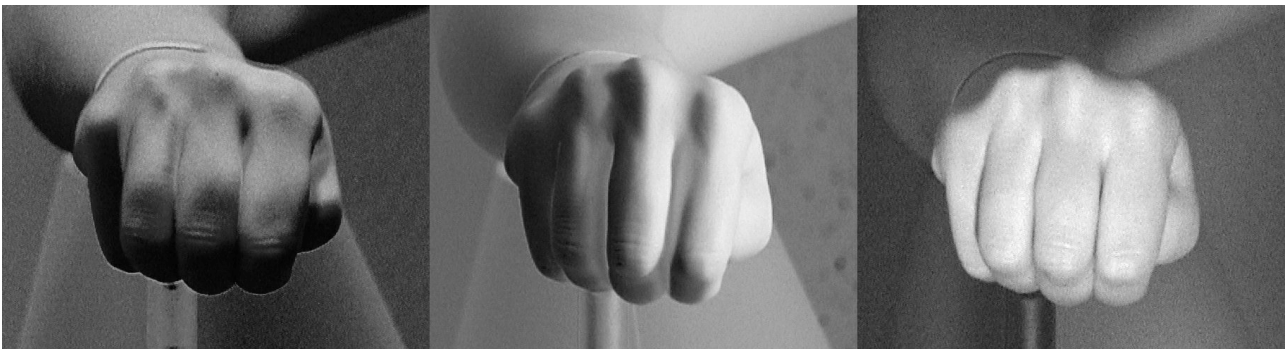
Sok alkalmazási lehetőség kínálkozik produkciós környezetben, hiszen a fotózásnak, a képek komponálásának alapvető eleme a megvilágítás. A módszer hasznos lehet például reklám- vagy portréfotózás esetén, ahol a művészeti vezetők a fotózás után is belenyúlhatnak utólag a kép fényviszonyaiba.

7. Hivatkozások

- [1] Kajiya, J., T.: The Rendering Equation, *In Proceedings of SIGGRAPH 86*, p. 143-150.
- [2] Yu, Y.: Image Based Surface Details, *Course 16 in Course Notes of SIGGRAPH 2000*.
- [3] Debevec, P., Hawkins, T., Tchou, C., Duiker, H., P., Sarokin, W., Sagar, M.: Acquiring the Reflectance Field of a Human Face, *In Proceedings of SIGGRAPH 2000*, p. 145-156.
- [4] Yu, Y., Debevec, P., Malik, J., Hawkins, T.: Inverse Global Illumination: Recovering Reflectance Models of Real Scenes From Photographs, *In Proceedings of SIGGRAPH 99*, p. 215-224.
- [5] Szirmay-Kalos, L.: Számítógépes grafika, Computer Books, 1999.



7. ábra: Az eredeti kép és az utólagos megvilágítás kombinációja.



8. ábra: Egy kézről készült fotók alapján rekonstruált normál vektor komponensek.



9. ábra: Az eredeti és az utólagos megvilágítás hatása.
Jól látszódik, hogy a Phong modell hatására létrejönnek a csillanások a kéz felületén