Programování grafických aplikací měřený vzhled a BTF

Radek Richtr

Institute of Information Theory and Automation
Academy of Sciences of the Czech Republic
Prague, Czech Republic

August 14, 2026



Outline I

1. Od modelu materiálu k měřenému vzhledu
   - Návaznost na P07+
2. Reprezentace vzhledu
   - BRDF, SVBRDF, BTF a BSSRDF
3. BRDF
   - BRDF
4. BTF
   - Textura
   - BTF texturování
5. DBTF
   - Časově proměnný vzhled
   - BTF + Dynamics
6. Syntéza textur
   - Syntéza textur
7. Doporučené zdroje

Cíle přednášky

Po absolvování přednášky by měl student umět:

- rozlišit analytický model materiálu od měřeného vzhledu;
- porovnat BRDF, SVBRDF, BTF, BSSRDF a jejich datové nároky;
- vysvětlit vzorkování úhlů a prostorovou parametrizaci BTF;
- popsat problém syntézy statických i dynamických textur.

Intro

- Velmi rychlý úvod do osvětlení a stínování
- Materiál + Textura
- Texturování
- Základní přehled a ukázka
- Dále rozvedeno v xGy předmětech

Co již známe

- Radiance popisuje světlo přenášené podél paprsku.
- BRDF mapuje příchozí a odchozí směr na odrazivost povrchu.
- Zobrazovací rovnice kombinuje osvětlení, geometrii a materiál.
- Analytické modely, například Lambert nebo mikrofacetová BRDF, mají málo parametrů.

Tato přednáška se ptá: co dělat, když je skutečný povrch příliš složitý pro jedinou homogenní analytickou BRDF?

Tři zdroje variability vzhledu

1. **Směrová**: vzhled závisí na směru osvětlení a pohledu.
2. **Prostorová**: vlastnosti se mění s polohou na povrchu.
3. **Časová**: materiál nebo struktura se vyvíjí v čase.

Volba reprezentace určuje, kterou variabilitu model zachytí a kolik dat potřebuje.

Textura parametrizuje materiál

Textura je obecná funkce prostorových souřadnic, která parametrizuje vlastnost materiálu:

$$\boldsymbol{\theta} = \boldsymbol{\theta}(u, v). \tag{1}$$

- může určovat base color, roughness, normal, metallic nebo další parametr,
- nemění sama o sobě osvětlovací model,
- jednotlivé mapy musí mít fyzikálně a barevně správnou interpretaci.

Analytický model versus měření

Analytický model

- málo parametrů,
- snadná editace a interpolace,
- nemusí zachytit složité materiály.

Měřený vzhled

- vysoká věrnost vzorkovaného materiálu,
- velký objem dat,
- nutná kalibrace, interpolace a komprese.

BRDF: směrová odrazivost v jednom bodě

$$f_r(\mathbf{x}, \omega_i, \omega_o) = \frac{\mathrm{d}L_o(\mathbf{x}, \omega_o)}{L_i(\mathbf{x}, \omega_i)|\mathbf{n} \cdot \omega_i| \, \mathrm{d}\omega_i}. \tag{2}$$

- Bod $\mathbf{x}$ je pevný; měníme dvojici směrů.
- BRDF nezachytí paralaxu, vzájemné stínění ani prostorovou strukturu větší než lokální bod.
- Analytickou BRDF popisuje několik parametrů, měřenou BRDF tabulka vzorků.

SVBRDF: materiál se mění v ploše

$$f_r = f_r(u, v, \omega_i, \omega_o). \tag{3}$$

- Parametry BRDF jsou textury definované nad povrchem.
- Běžný PBR materiál je praktická nízkorozměrná SVBRDF.
- Zachytí prostorově proměnnou barvu a odrazivost, ale obvykle předpokládá lokálně plochý povrch.
- Mikrogeometrie je aproximována normálovou či výškovou mapou a roughness.

BTF: vzhled textilie a strukturovaných povrchů

$$\mathrm{BTF}(u, v, \omega_i, \omega_o) \rightarrow \text{barva pixelu.} \tag{4}$$

- BTF přímo zaznamenává obrazový vzhled pro polohu a dvojici směrů.
- Implicitně obsahuje lokální stíny, masking, paralaxu a vícenásobné odrazy.
- Není pouze BRDF uložená do textury.
- Cena za věrnost: vysoká dimenze, objem dat a obtížná interpolace.

BSSRDF: světlo vystupuje jinde

BRDF předpokládá, že světlo vstoupí a vystoupí ve stejném bodě.
BSSRDF připouští různé body $\mathbf{x}_i$ a $\mathbf{x}_o$.

- důležité pro kůži, vosk, mléko, mramor nebo listy,
- modeluje podpovrchový rozptyl,
- není totéž co průhlednost ani běžná BTDF.

Taxonomie reprezentací

Model	**směry**	**poloha**	**nelokální přenos**
BRDF	ano	pevná	ne
SVBRDF	ano	proměnná	ne
BTF	ano	proměnná	implicitně
BSSRDF	ano	vstup/výstup	ano
DBTF	ano	proměnná + čas	implicitně

Měřicí řetězec

1. geometrická a radiometrická kalibrace kamer a světel,
2. definice množiny směrů osvětlení a pohledu,
3. snímání v lineárním režimu s kontrolovanou expozicí,
4. registrace snímků do společných prostorových souřadnic,
5. odstranění vadných vzorků a normalizace,
6. komprese a model pro interpolaci chybějících směrů.

Interpolace není detail implementace

- Měřicí zařízení pokrývá pouze konečnou množinu směrů.
- Nejbližší vzorek vytváří skoky při pohybu kamery nebo světla.
- Lineární interpolace v úhlech nemusí odpovídat geometrii jednotkové sféry.
- Lesklé odlesky vyžadují hustší vzorkování nebo vhodný model laloku.
- Chybu je nutné hodnotit ve směrové i prostorové oblasti.

Materiál

- Zatím jsem měli jeden materiál s několika parametry pro jeden objekt.
- Co objekty, jejíž jednotlivé části se chovají *různě*?
  - látka svatru: bavlna + výšivka
  - bunda s našivkami z reflexní látky
  - více druhý vláken (trojhranná, ...)
  - chameleon nástřik u auta, CD, ...







Materiál

Empirické modely

Velká část chování, včetně samotného osvětlovacího modelu, má daleko do realistického chování povrchů. Jde o odhad, aproximaci, jen někdy přesnou a správnou.

Normálová mapa *jde* spočíst z výškové mapy. (viz. PGA)
Enviroment mapa *jde* nameřit (zjednodušeně).
Jak získat spekulární mapu? Ambient occlusion mapu? atd.?
Ukázka 0:15, Colossus.

BRDF (obousměrná odrazová funkce)

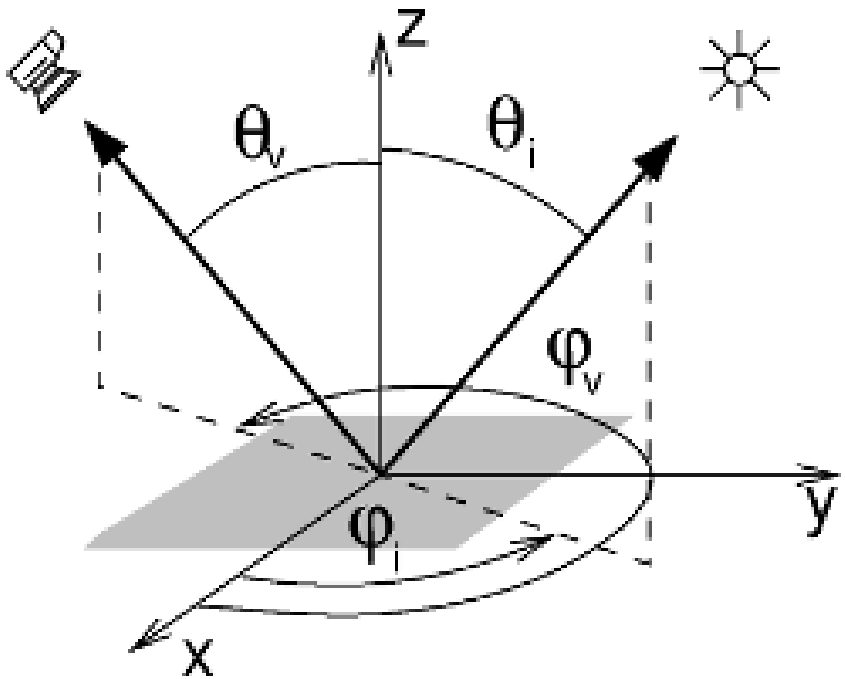
- Většina světla, která vidíme je *odražené*.
- Barva objektu je dána spektrální charakteristikou světla, které na něj dopadá, ale *především* vlastnostmi povrchu, zejména tím, jaké vlnové délky v jakém směru odráží.
- Obusměrná odrazová funkce BRDF charakterizuje odrazové schopnostmi *materiálu* v určitém jeho bodě x.
  - světlo dopadá ve směru ω_i a odráží se do směru ω_r
  - BRDF se označuje $f_r(x, \omega_r, \omega_i)$ a definuje *poměr* odražené radiance v daném bodě x označení jako $dL_r(x, \omega_r)$ ke vstupní radianci $dL_i(x, \omega_i)$ promítnuté na kolmou plochu

$$f_r(x, \omega_r, \omega_i) = \frac{dL_r(x, \omega_r)}{dL_i(x, \omega_i)(\omega_i n)d\omega_i} \tag{5}$$

Pokud radiance dopadá kolmo na plochu, je tedy přijatý světelný výkon nejsilnější.

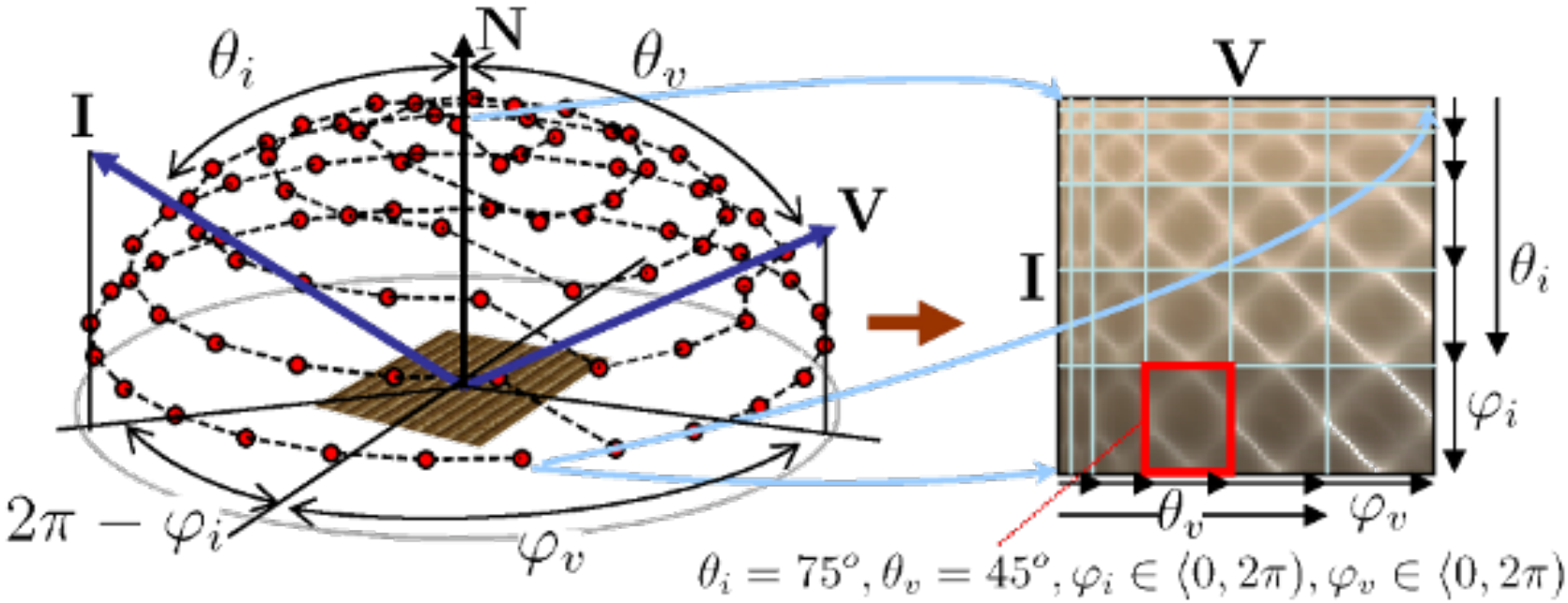
BRDF

- Měření BRDF



BRDF

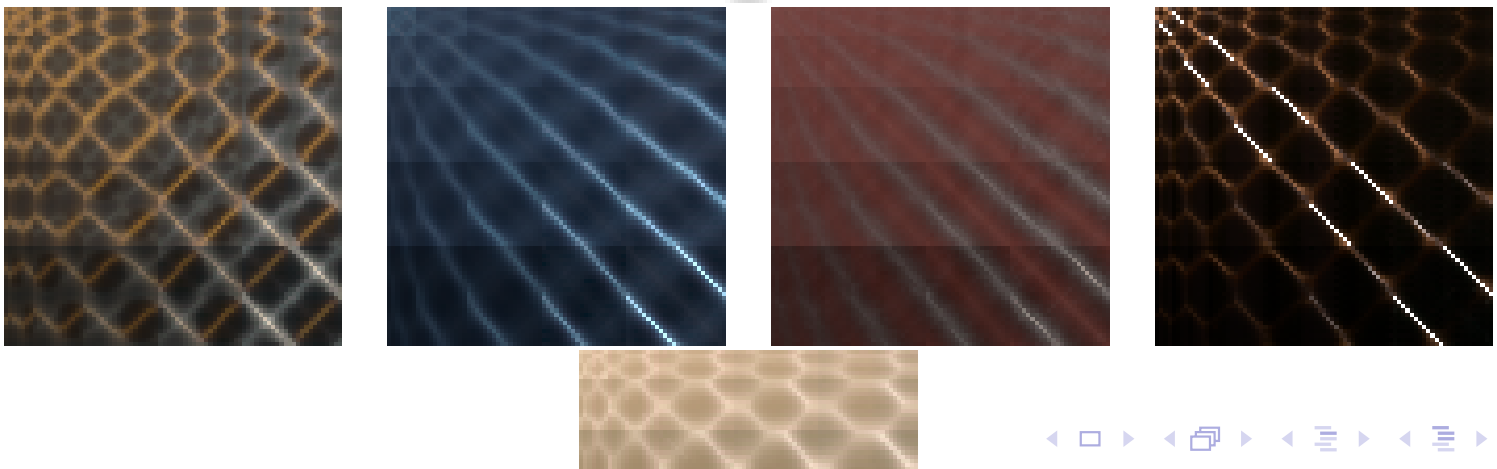
- http://btf.utia.cas.cz/



BRDF

- http://btf.utia.cas.cz/





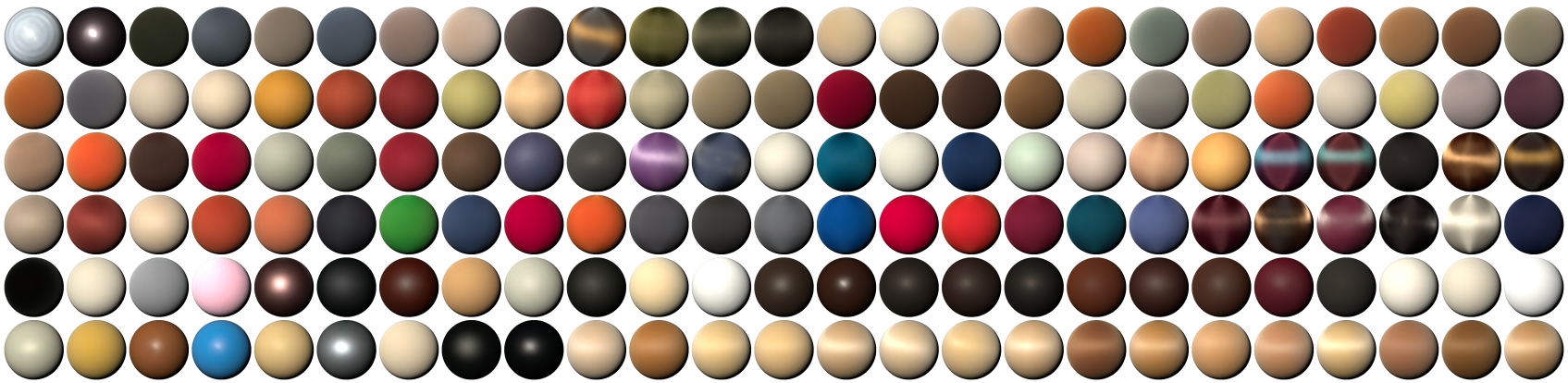
BRDF

- http://btf.utia.cas.cz/



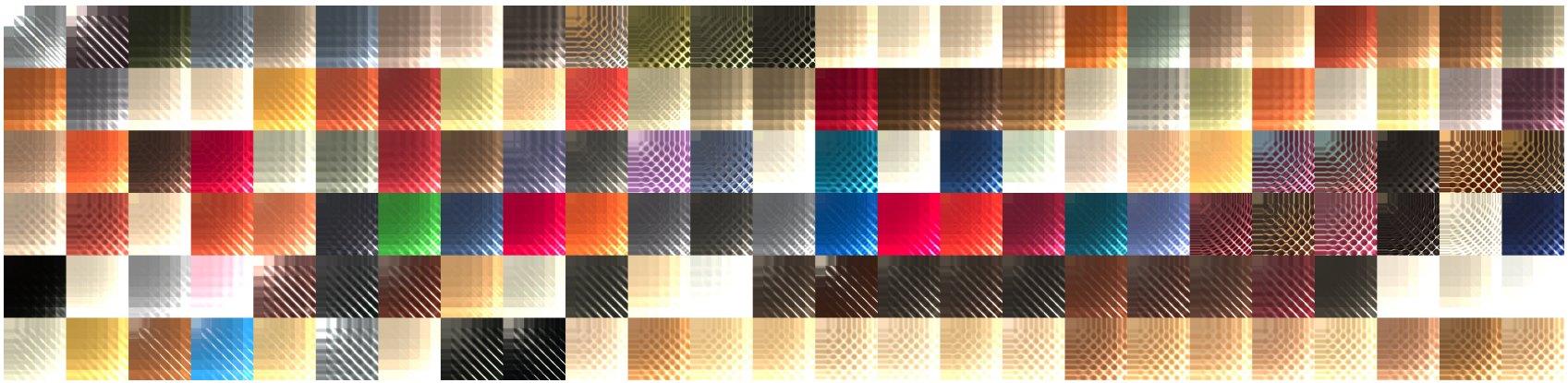
BRDF

- http://btf.utia.cas.cz/

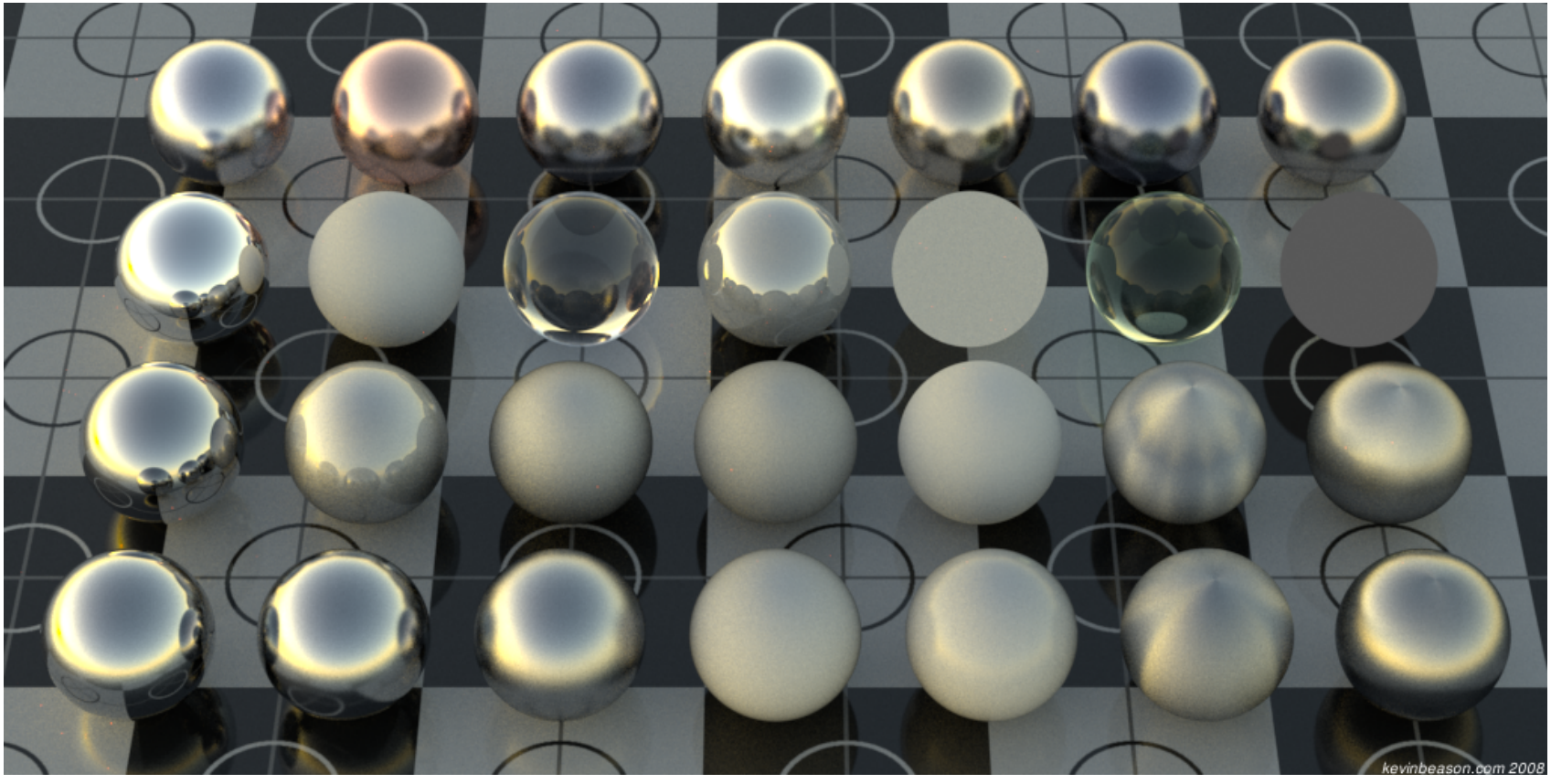


BRDF

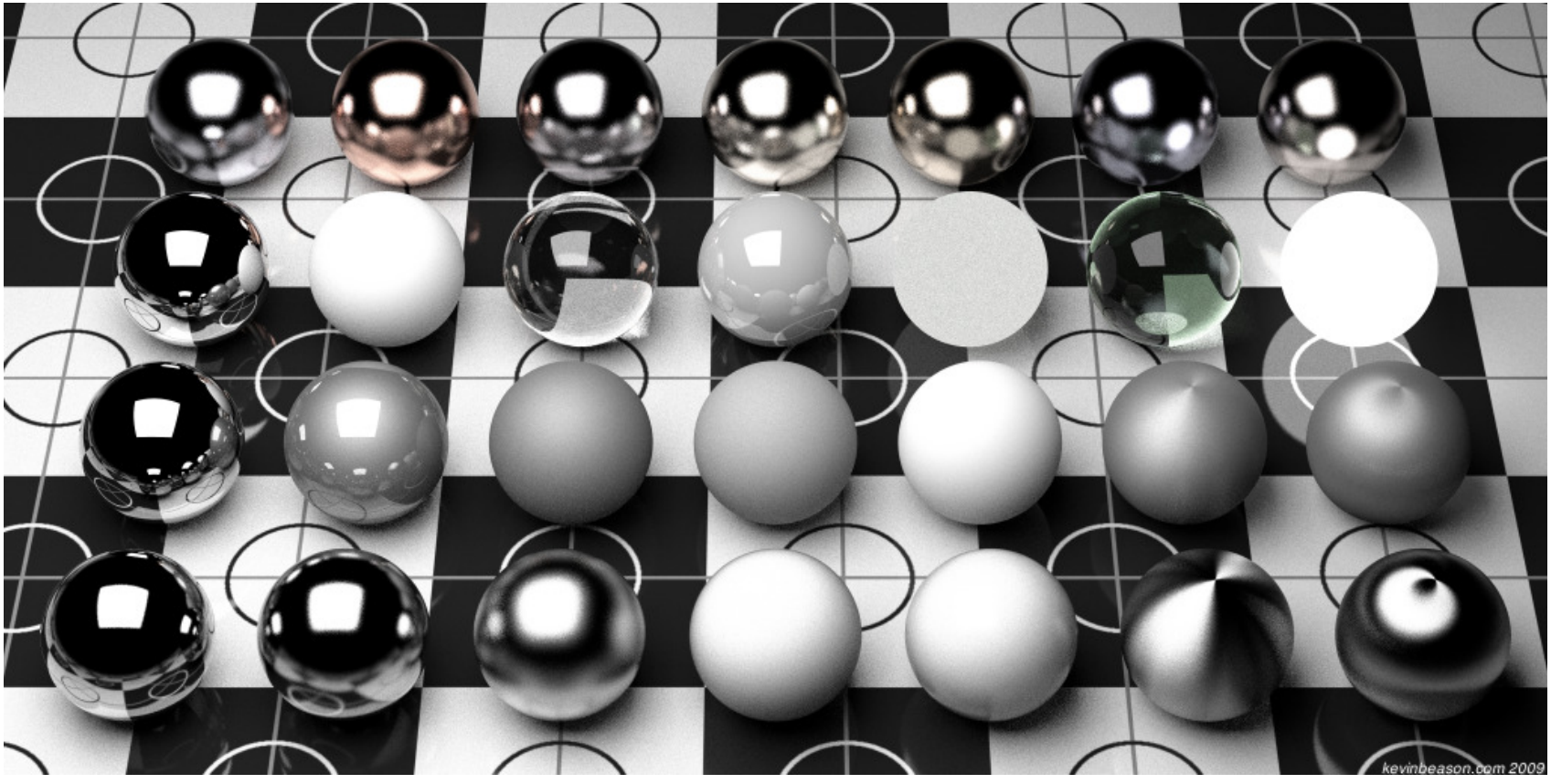
- http://btf.utia.cas.cz/



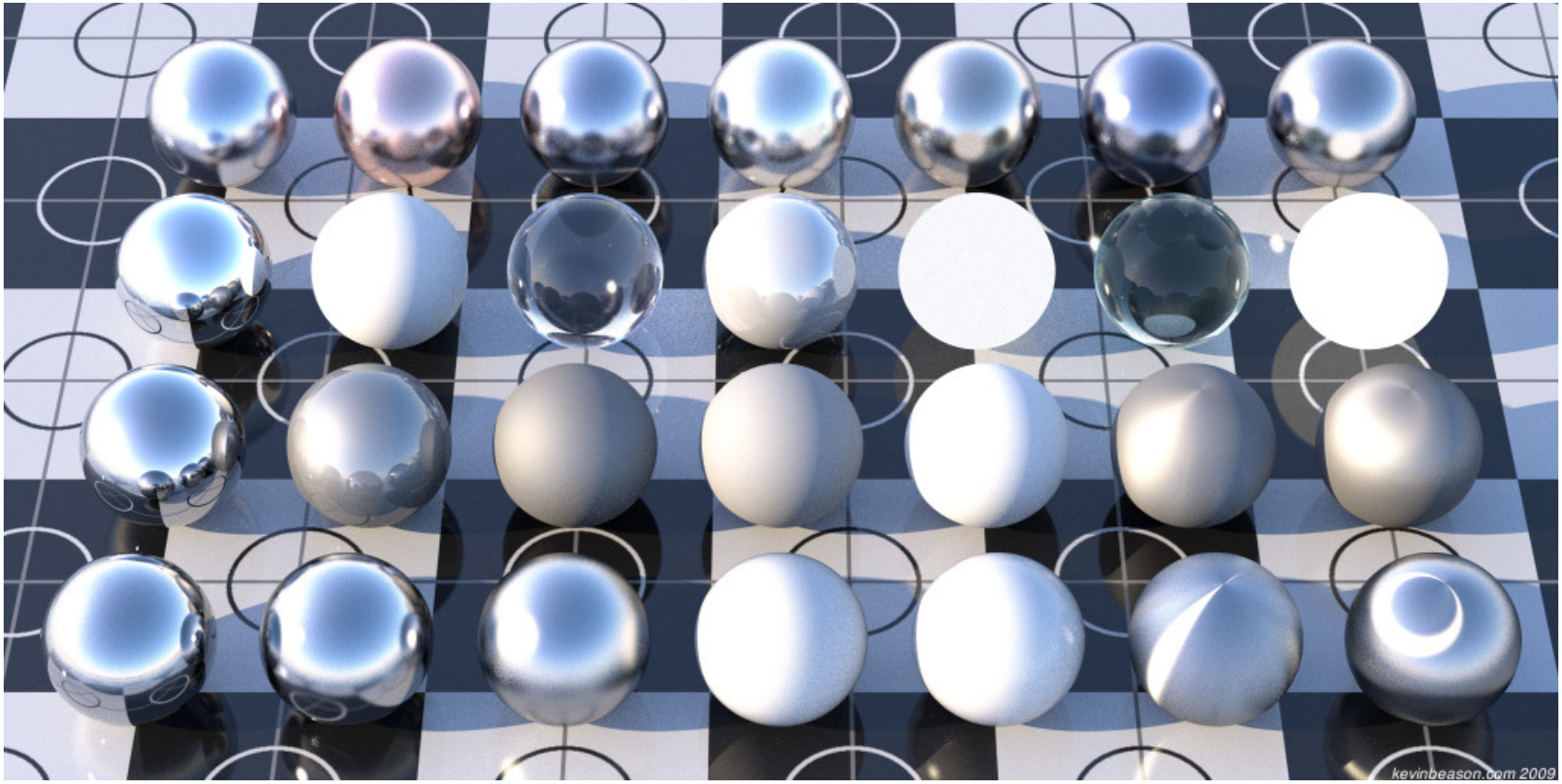
BRDF



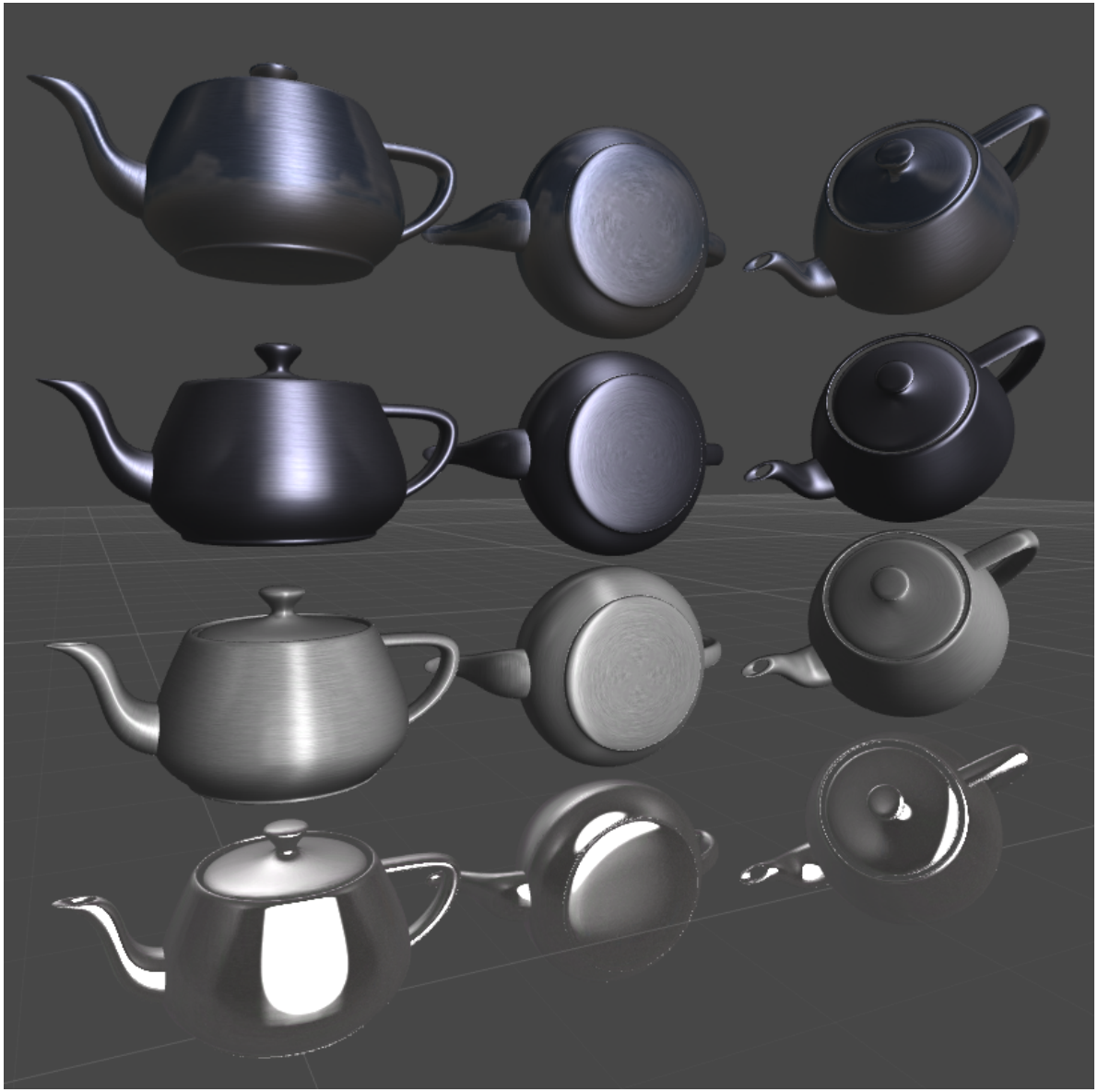
BRDF



BRDF



BRDF



BRDF





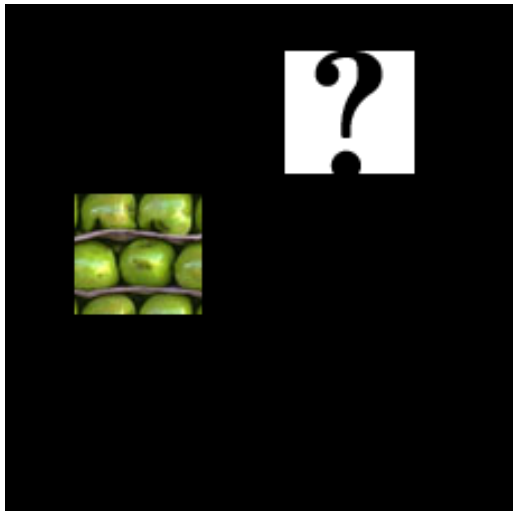
BRDF

- Umožňuje realistické chování materiálů.
- Různé chování v závisosti na úhlu pohledu a osvětlení.
- Nutný základ realistického renderování.
- Využívá se v kombinaci s reáléji zaěřenými technikami.
  - např. enviroment mapy
- Dovoluje tedy použít *anisotropní* povrchy.
- Nejhrubější dustatečné meření, tj. 81 x 81 pohledů.

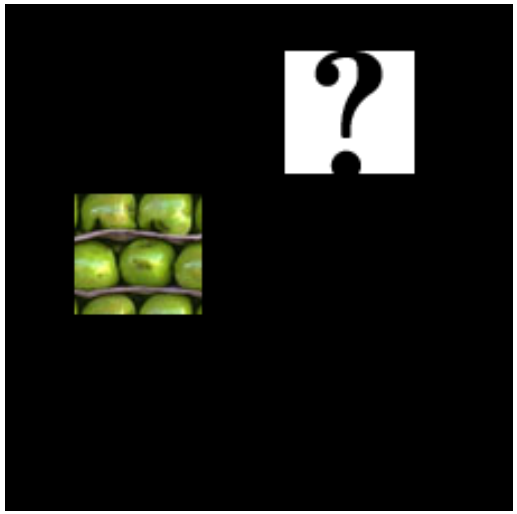
Textura

- Co je to vlastně textura?

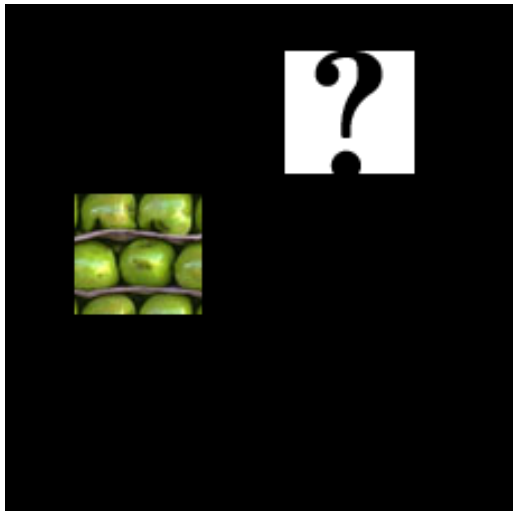
Textura



Textura

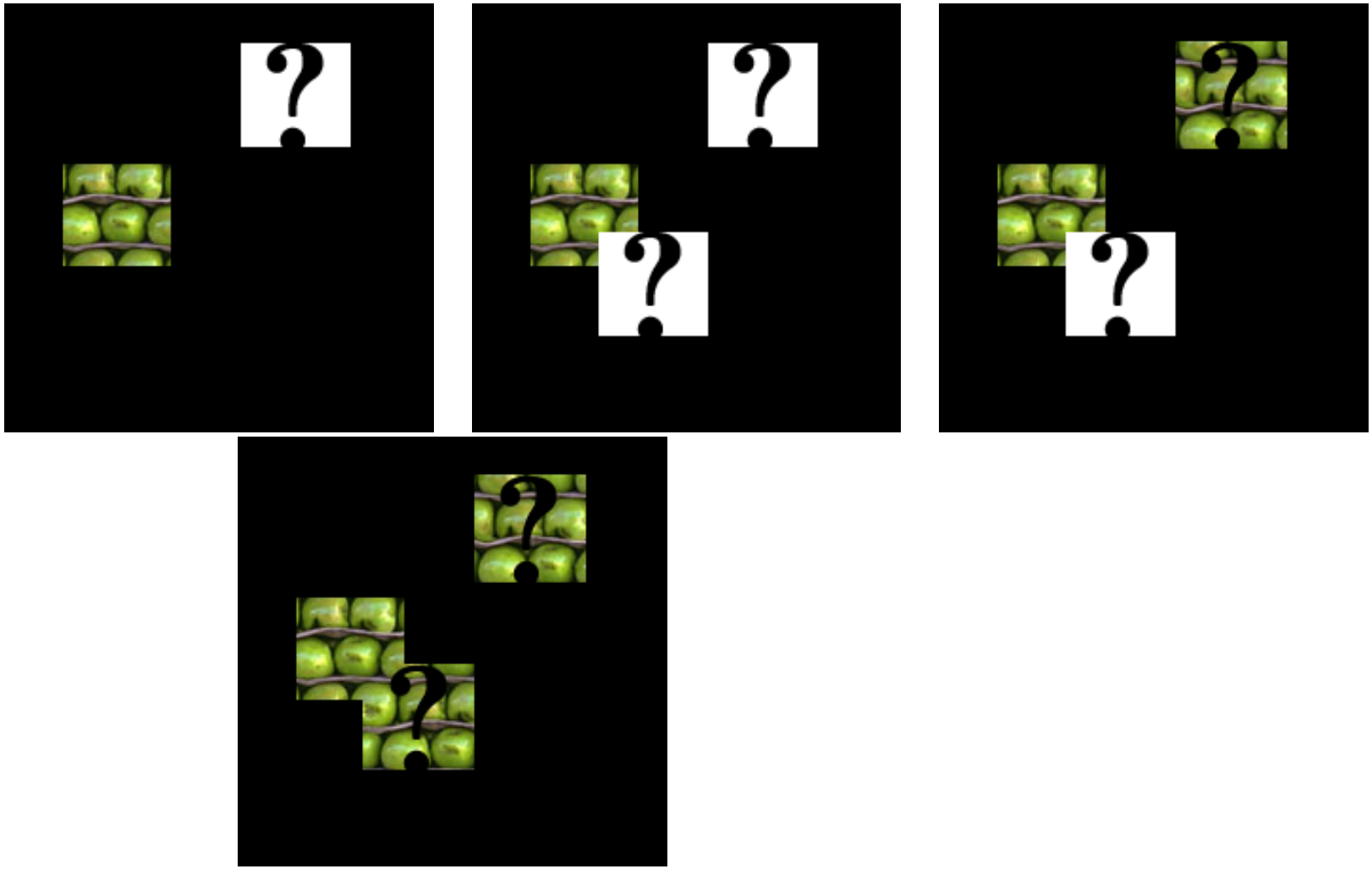



Textura

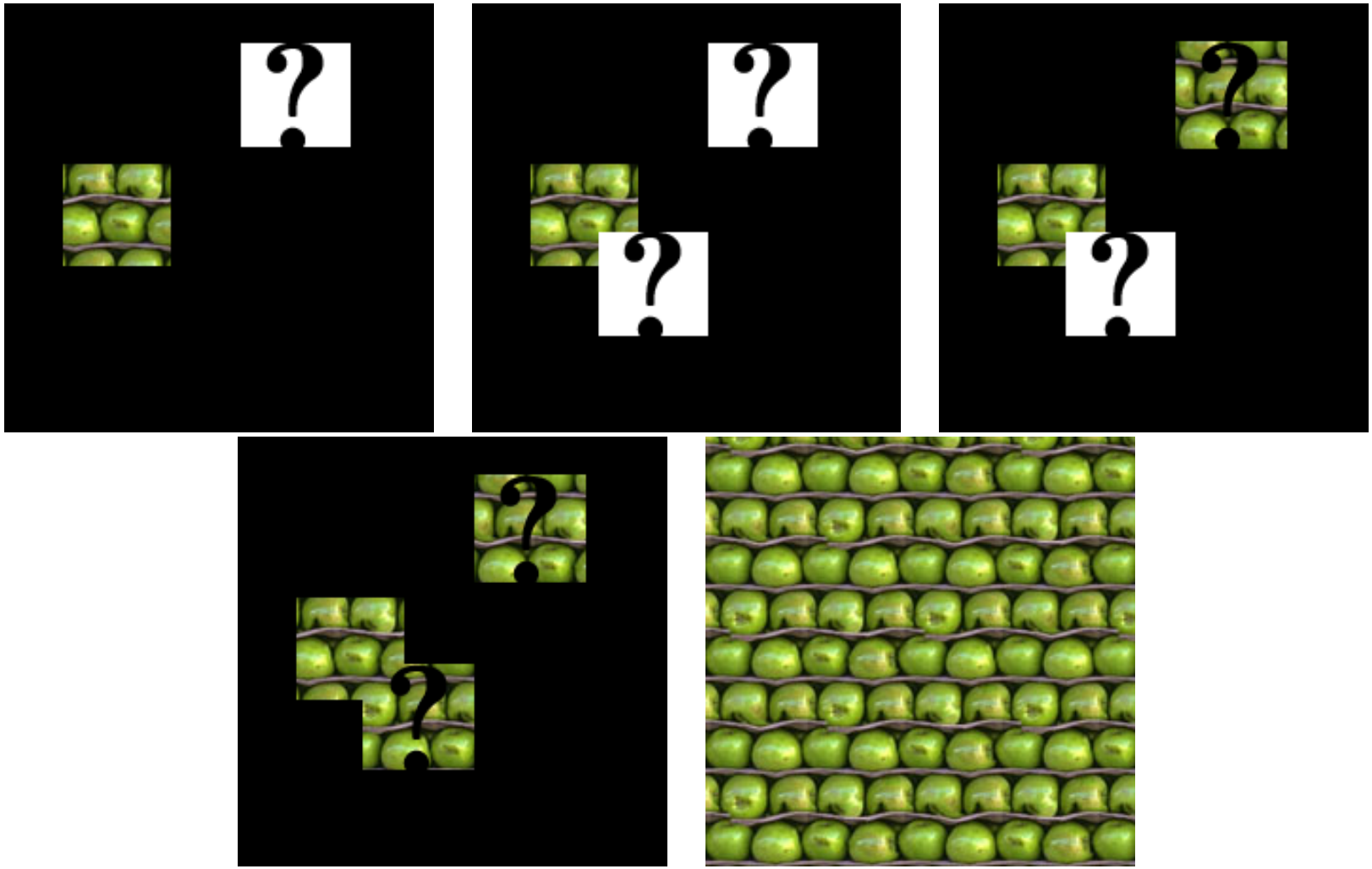




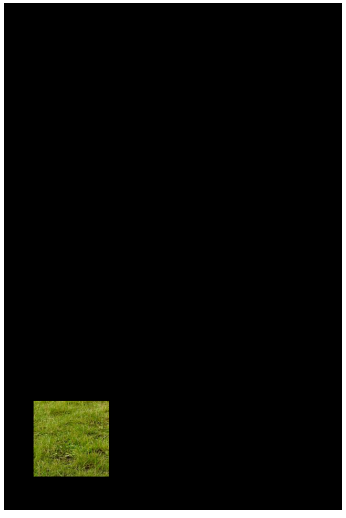
Textura



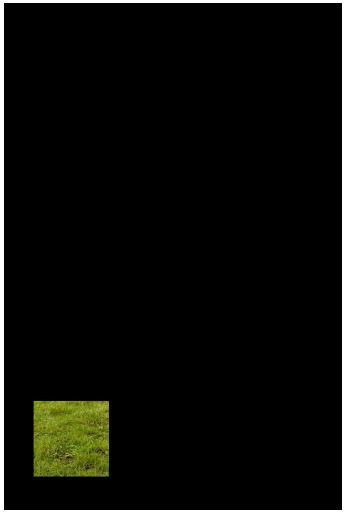
Textura

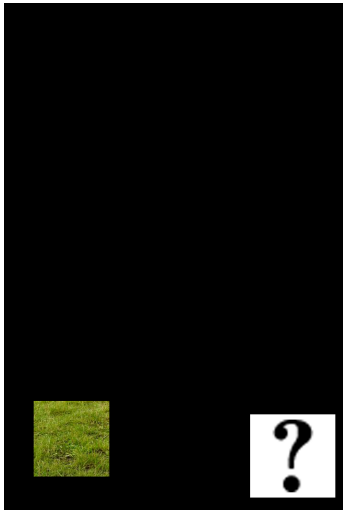


Textura

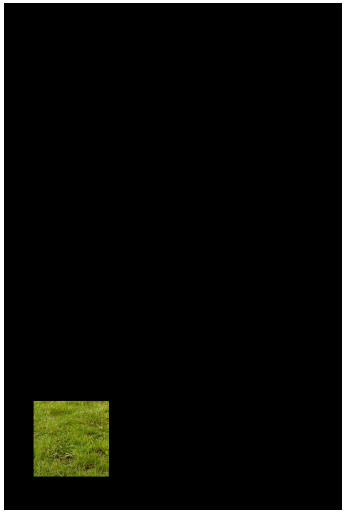


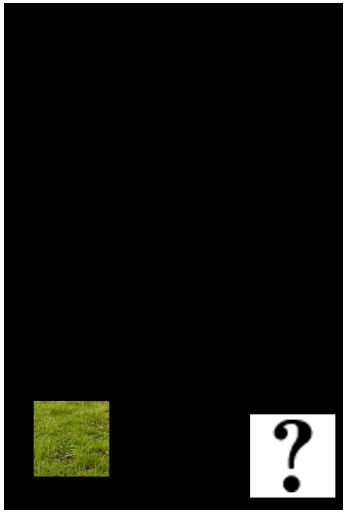
Textura

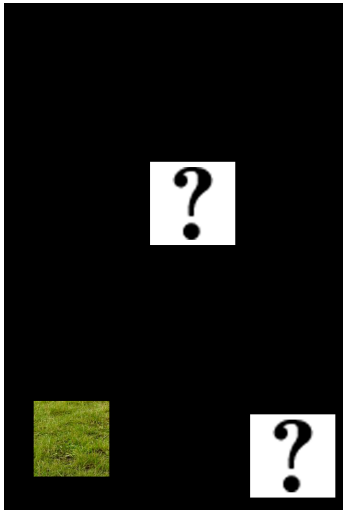




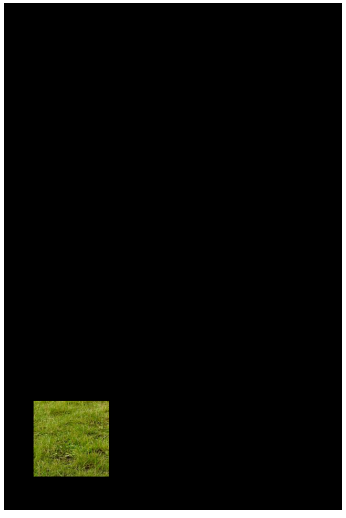
Textura

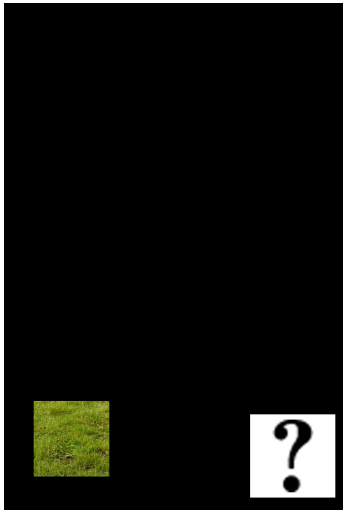


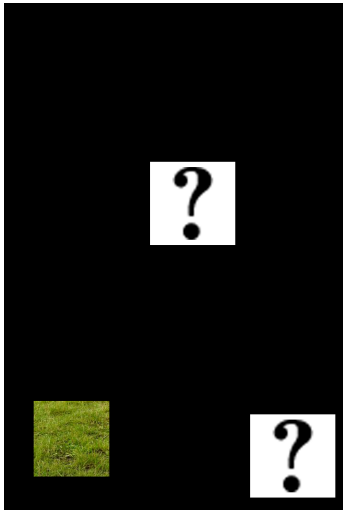


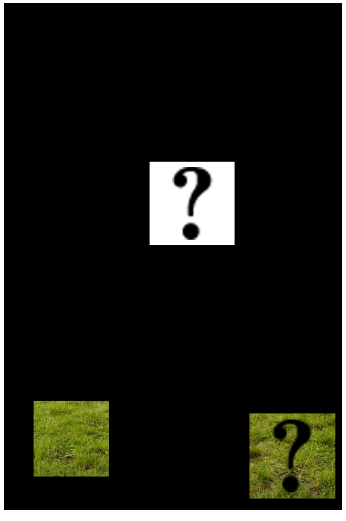


Textura

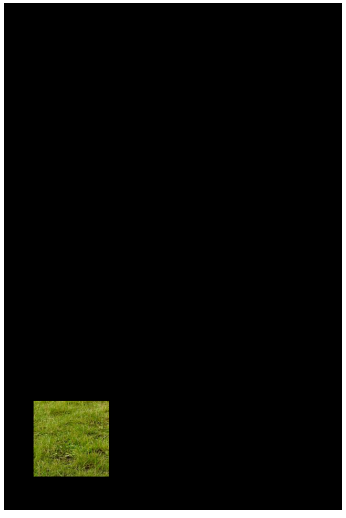


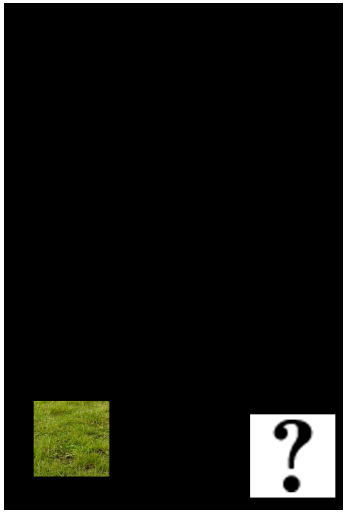


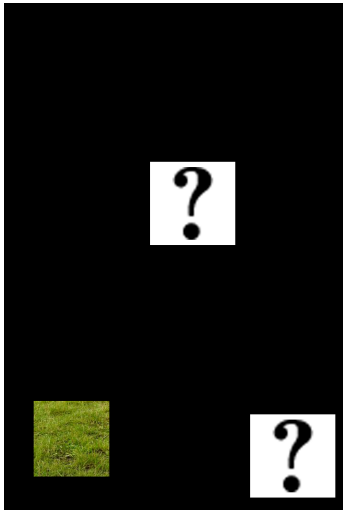


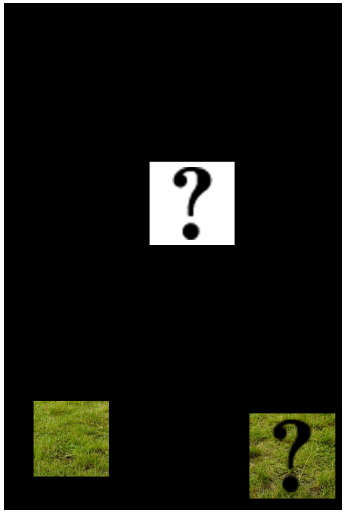


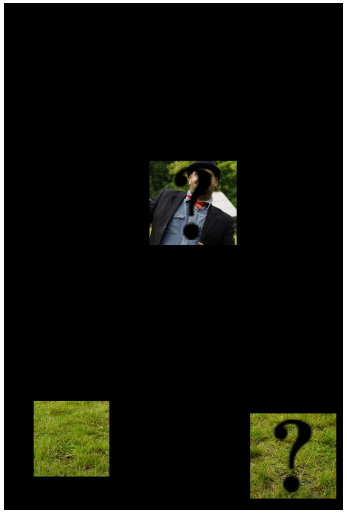
Textura



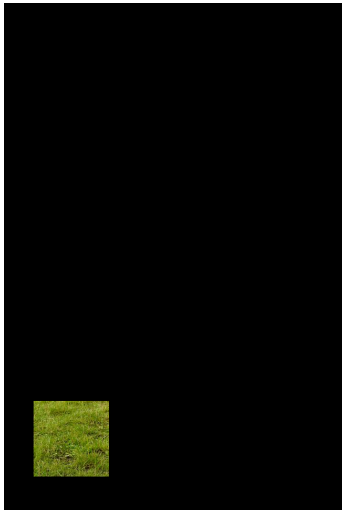
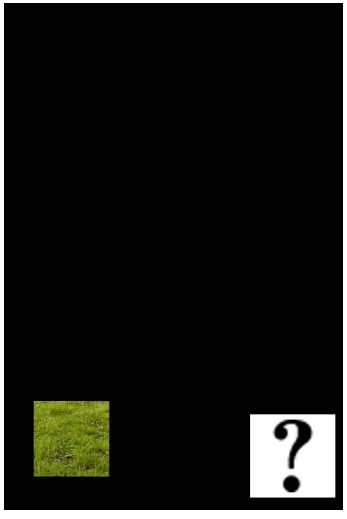
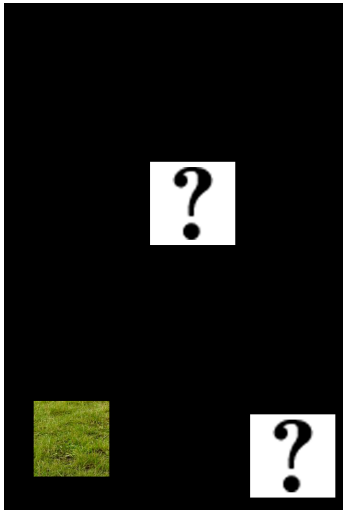
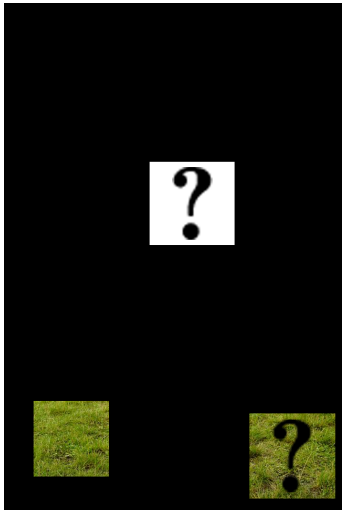
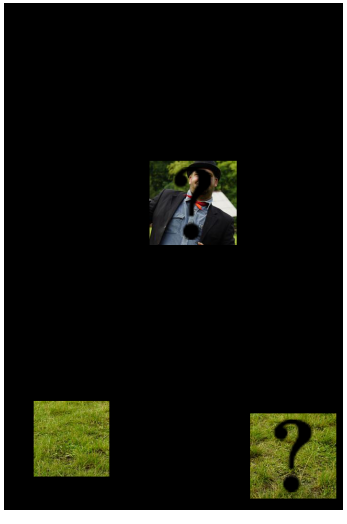








Textura


Textura

- Exaktní definice textury neexistuje.
- Přesto je množství kritérií, které musí spňovat.
- Základní je homogenita ve všech dimenzích.
- To, že základní vlastnosti textury se průběžně nemění ji umožňují syntetizovat a zacházet s ní jako s celkem.
- Textura tedy není libovolný obrázek napláclý na 3D model.

Základní vlastnost textury

Základní vlastností textury je to, že je (více či méně) homogenní. Tj. z jedné její části je možné odhadnout, jak vypadá jiná část. Jinými slovy dostatečný malý kus textury obsahuje včechny frekvence, které se objevují i ve všech dalších částech textury.

Spatial homogeneity - random placed universal patch











Spatial homogeneity - random placed universal patch











Spatial homogeneity - random placed universal patch







Spatial homogeneity - random placed universal patch









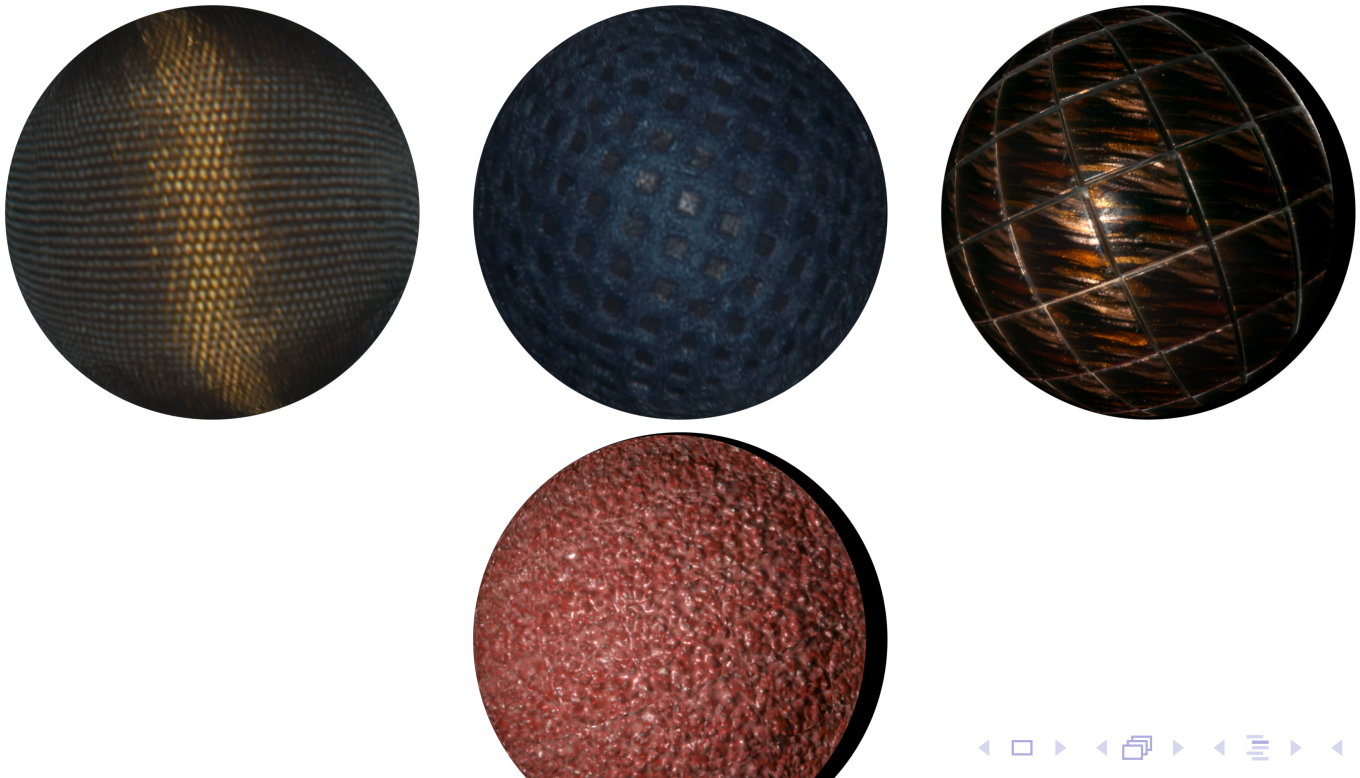


BTF

- BTF - biderectional texture function.
- BRDF pracuje jen s materiálem a jeho chováním nikolik už s texturou.
- Přidává další dimenze - u a v, tedy pohyb v samotné textuře. Nejde tedy o měření jediného bodu.
  - tj. funkce je 6 rozměrná
  - objem dat se dostává minimálně do řádu několika GB.
  - $81 \times 81 \times 512 \times 512 \times 3B$

BTF

- BTF - biderectional texture function.
- BRDF pracuje jen s materiálem a jeho chováním nikoliv už s texturou.
- Přidává další dimenze - u a v, tedy pohyb v samotné textuře. Nejde tedy o měření jediného bodu.
  - tj. funkce je 7 rozměrná

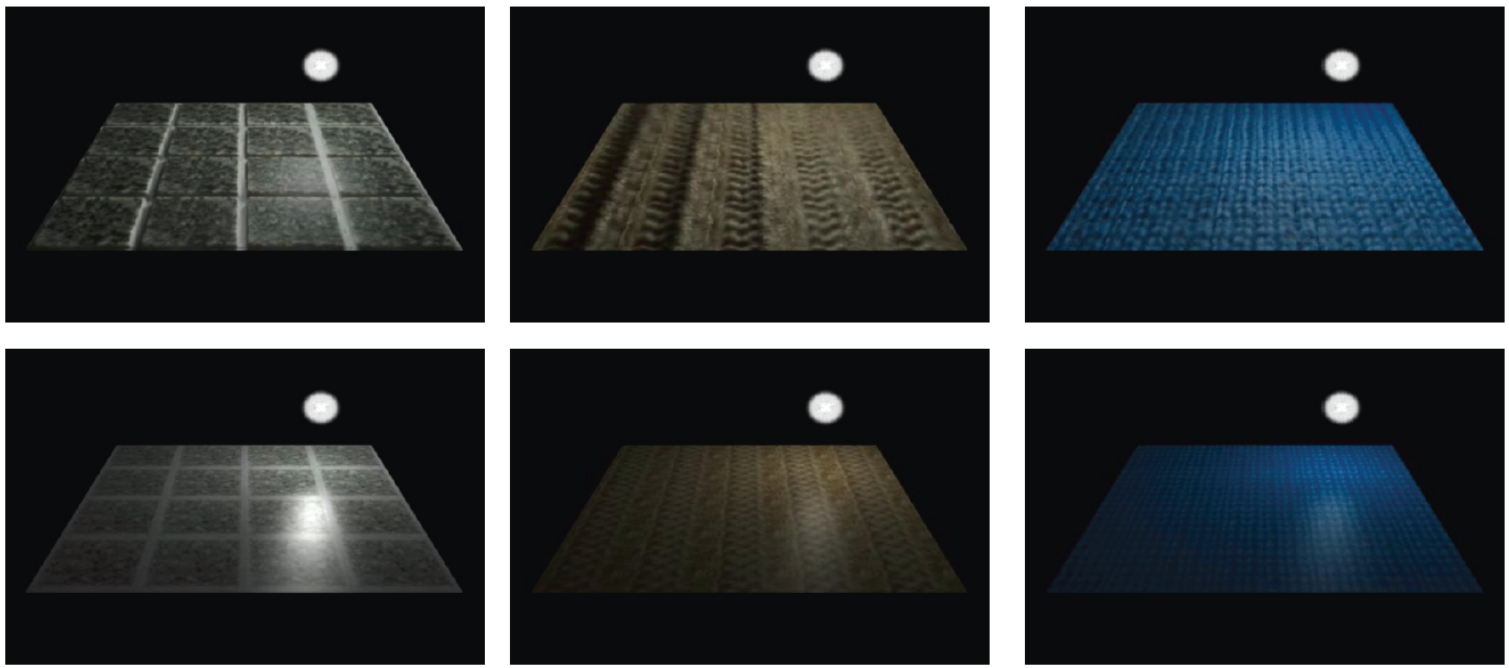


BTF

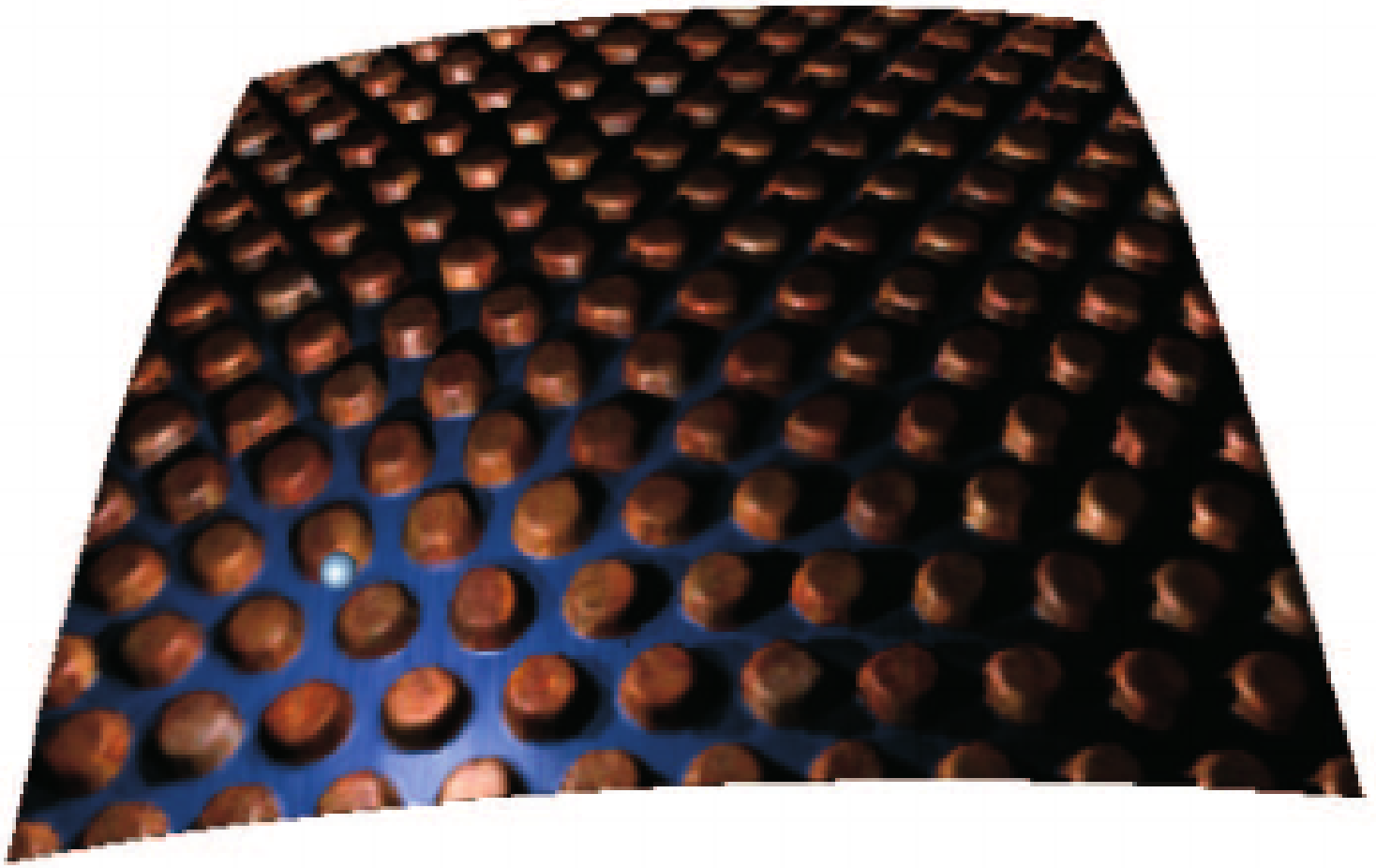
- BTF umožňuje naměřit více, než prostý povrch. Ten v důsledku může mít větší povrch než je rozměr samotné textury!
  - proč?
- Povrch objektu nemusí být pouhou výškovou mapou!
  - $\times$ paralax mapping?
  - $\times$ displecement mapping?
  - $\times$ bump mapping?
- Principielně je textura zastíněna sama sebou.
- Vzhledem k masivní redundanci dat existuje značné množství kompresních metod.



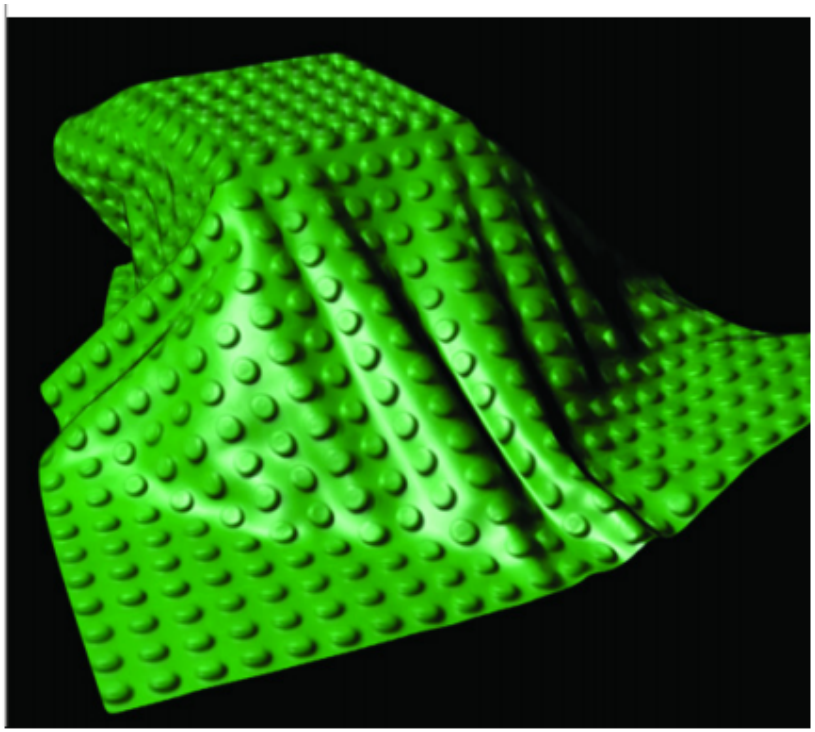
BTF

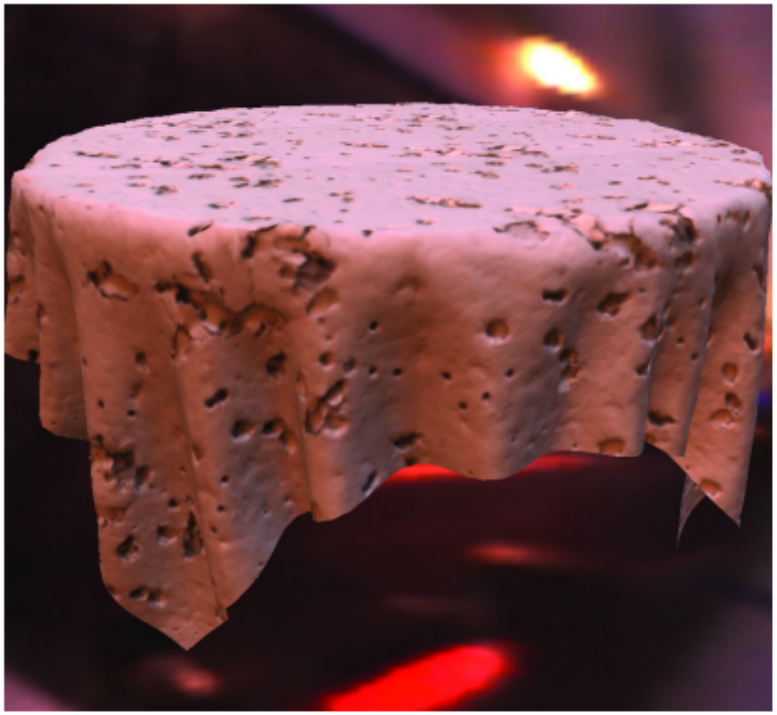


BTF

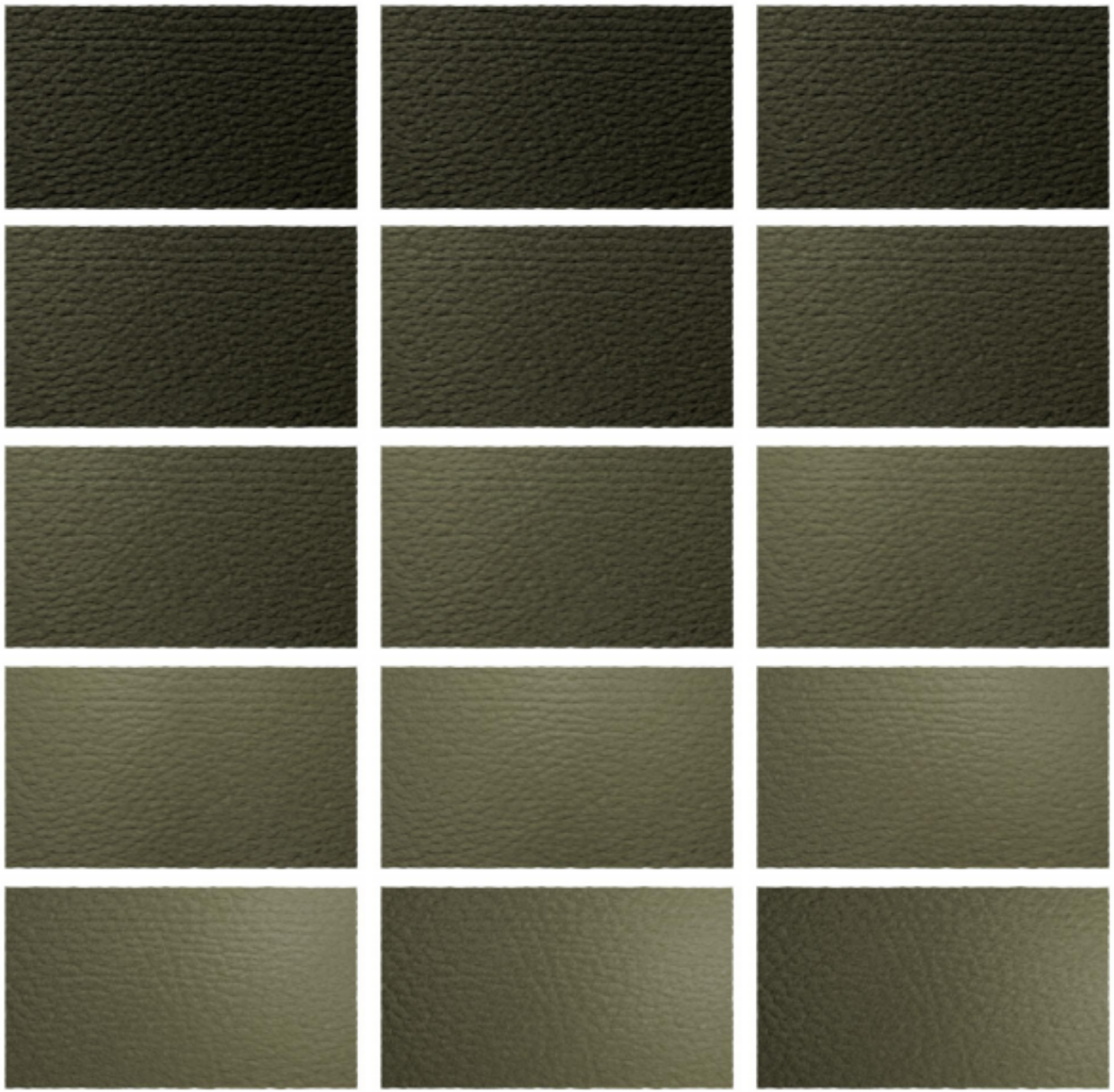


BTF

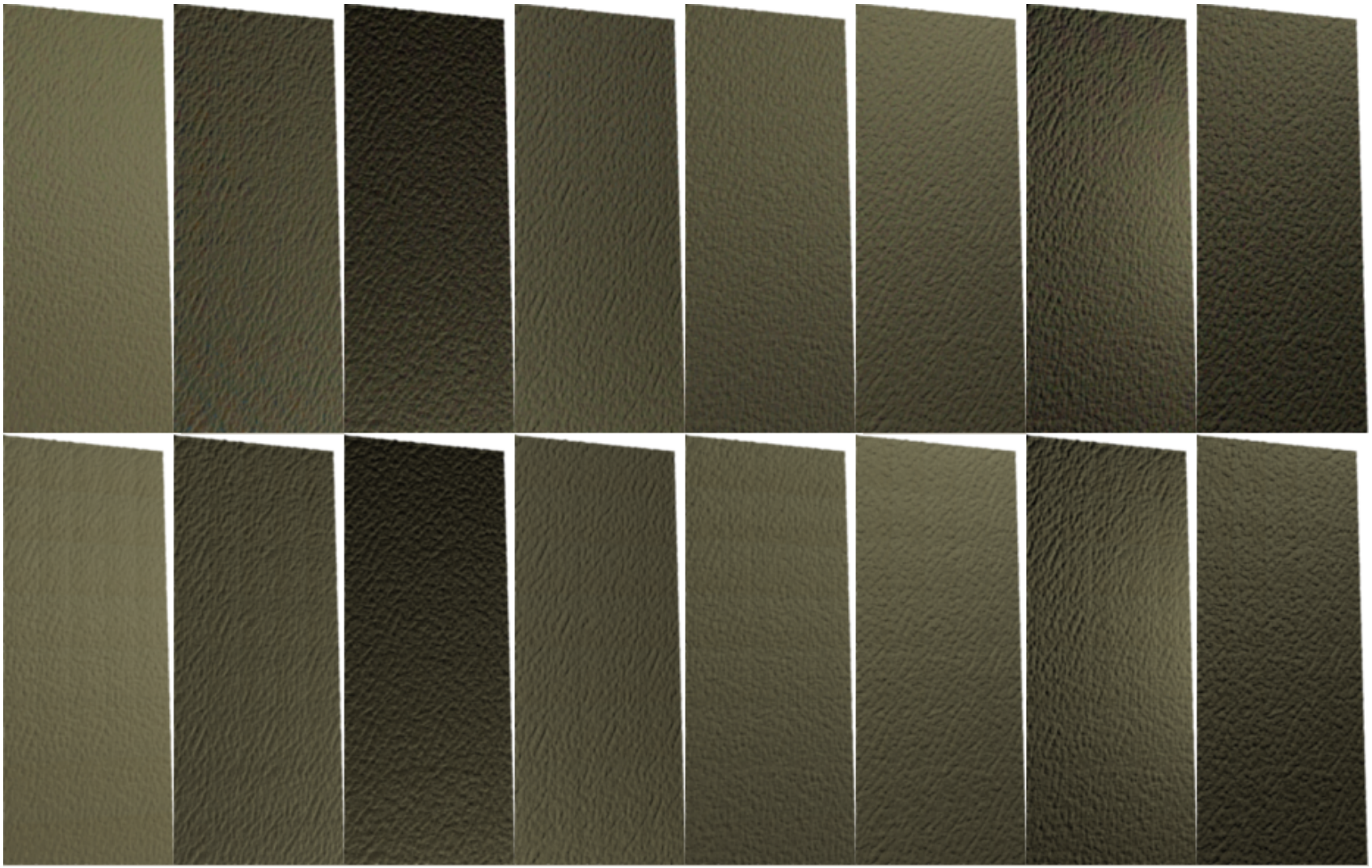




BTF



BTF

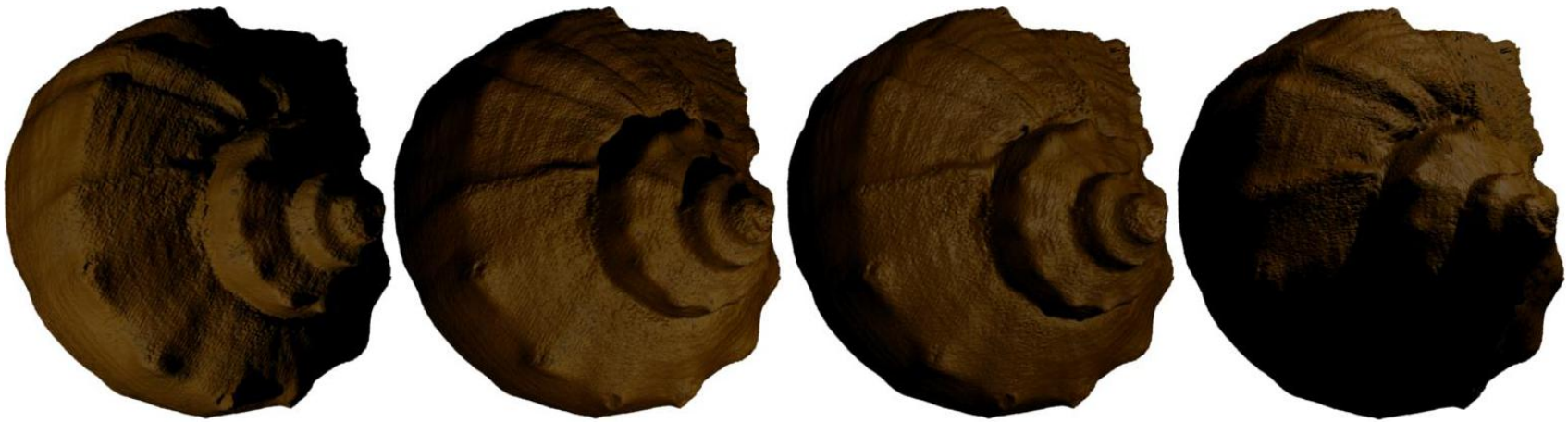


BTF

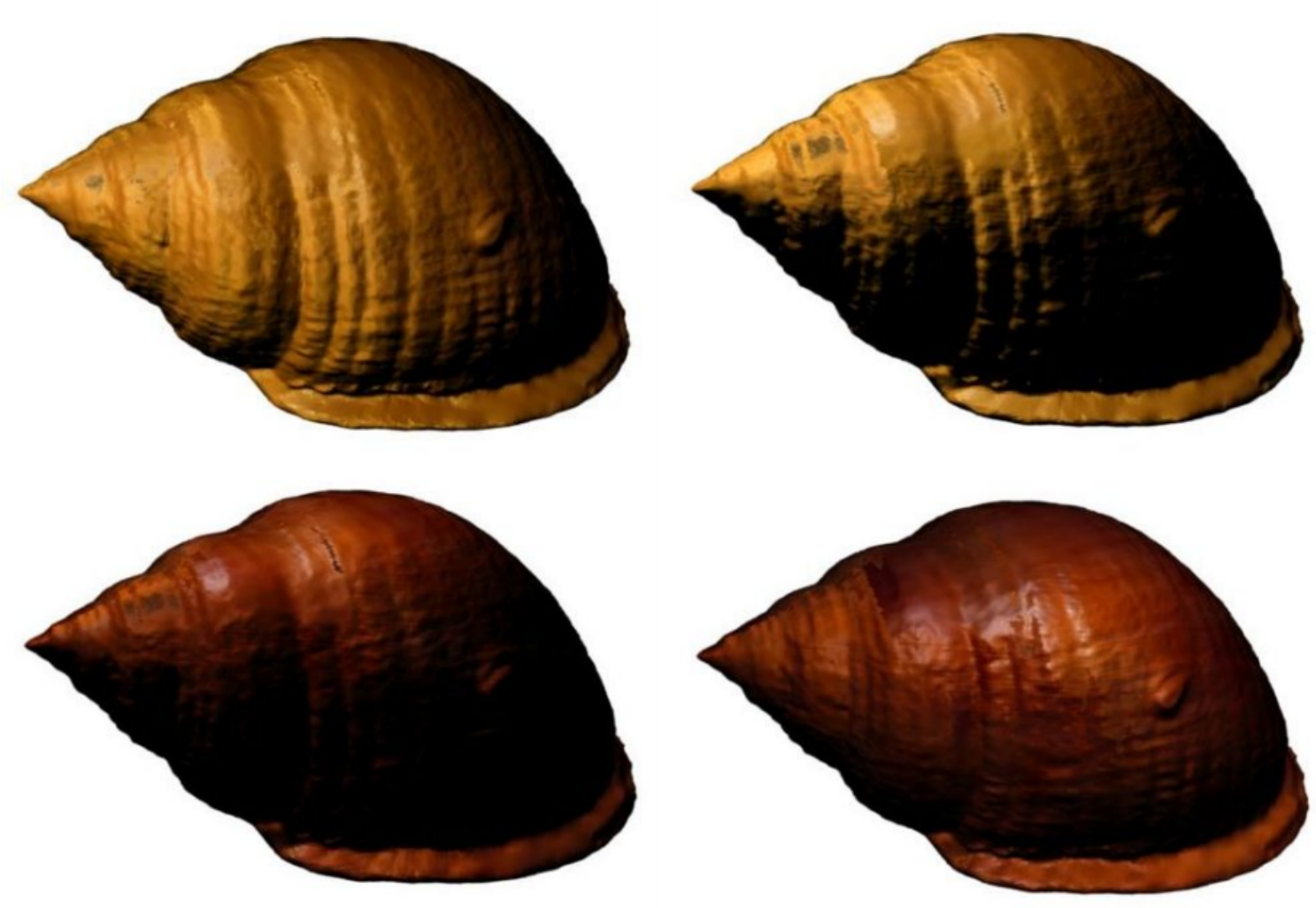

ÚTIA
Leather BTF
measured BTF
synthesised BTF (GMRF)
+ enlarged twice
+ huge compression
lit smooth texture

Ukázka

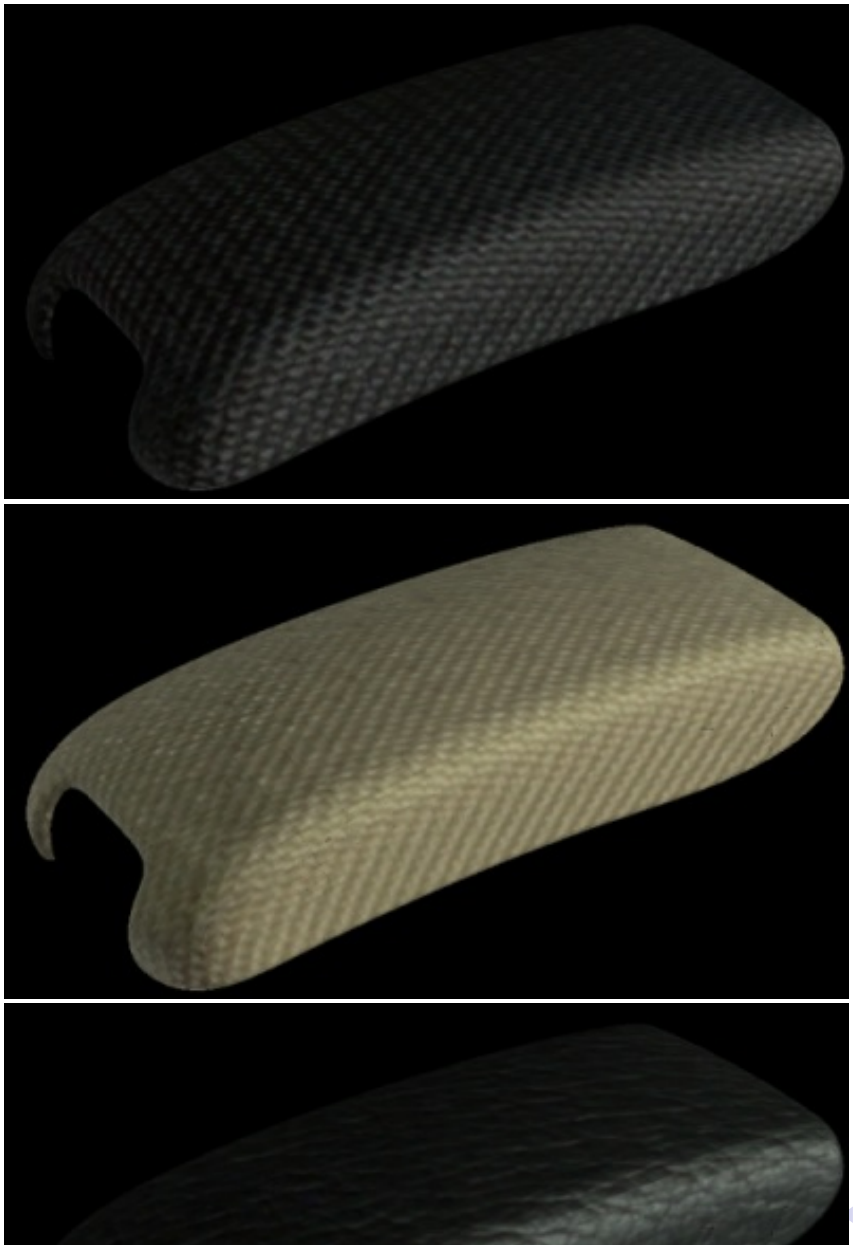
BTF



BTF



BTF



BTF



BTF



BTF



Od BTF k DBTF

$$\mathrm{DBTF}(u, v, \omega_i, \omega_o, t) \rightarrow \text{barva pixelu v čase } t. \tag{6}$$

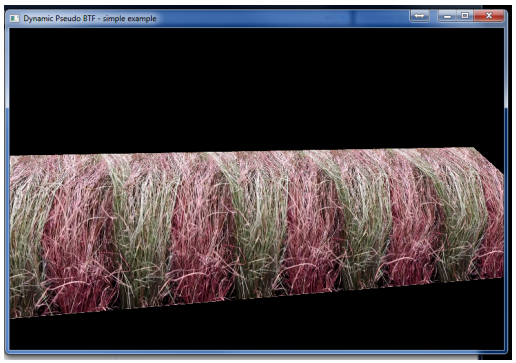
- Čas může popisovat deformaci, stárnutí, růst, vysychání nebo změnu osvětlení.
- Data musí rozlišit změnu materiálu od pohybu a změny expozice.
- Přímé uložení všech rozměrů je obvykle nepraktické; nutná je komprese nebo generativní model.

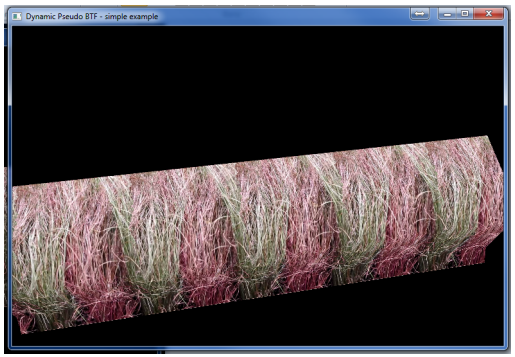
Co musí časový model zachovat

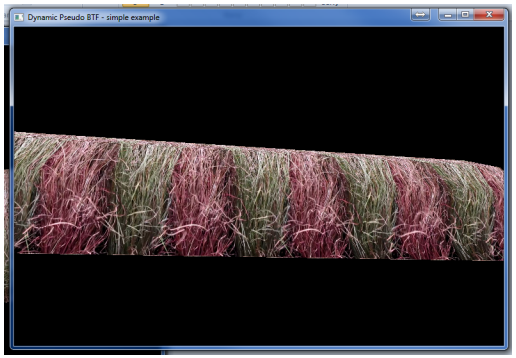
- prostorovou koherenci: struktura nesmí mezi snímky náhodně přeskakovat,
- směrovou koherenci: změna pohledu a světla musí být plynulá,
- materiálovou identitu: stejný proces má působit konzistentně na celé sekvenci,
- kauzální interpretaci parametrů, pokud má být model editovatelný.

DBTF

- 8 (9) rozměrný model
- Dynamická textura zachycuje vývoj jen v čase
- BTF Zachycuje jen chování při změní pohledu a osvětlení
- Zachycení míkrostínů v textuře bez nutnosti modelování 3D objektu
- Distorze při ostrých úhlech
- Změna struktury vs. mix DT







DBTF

- Sestavený Povrch



DBTF

- Špatný zoom :-)



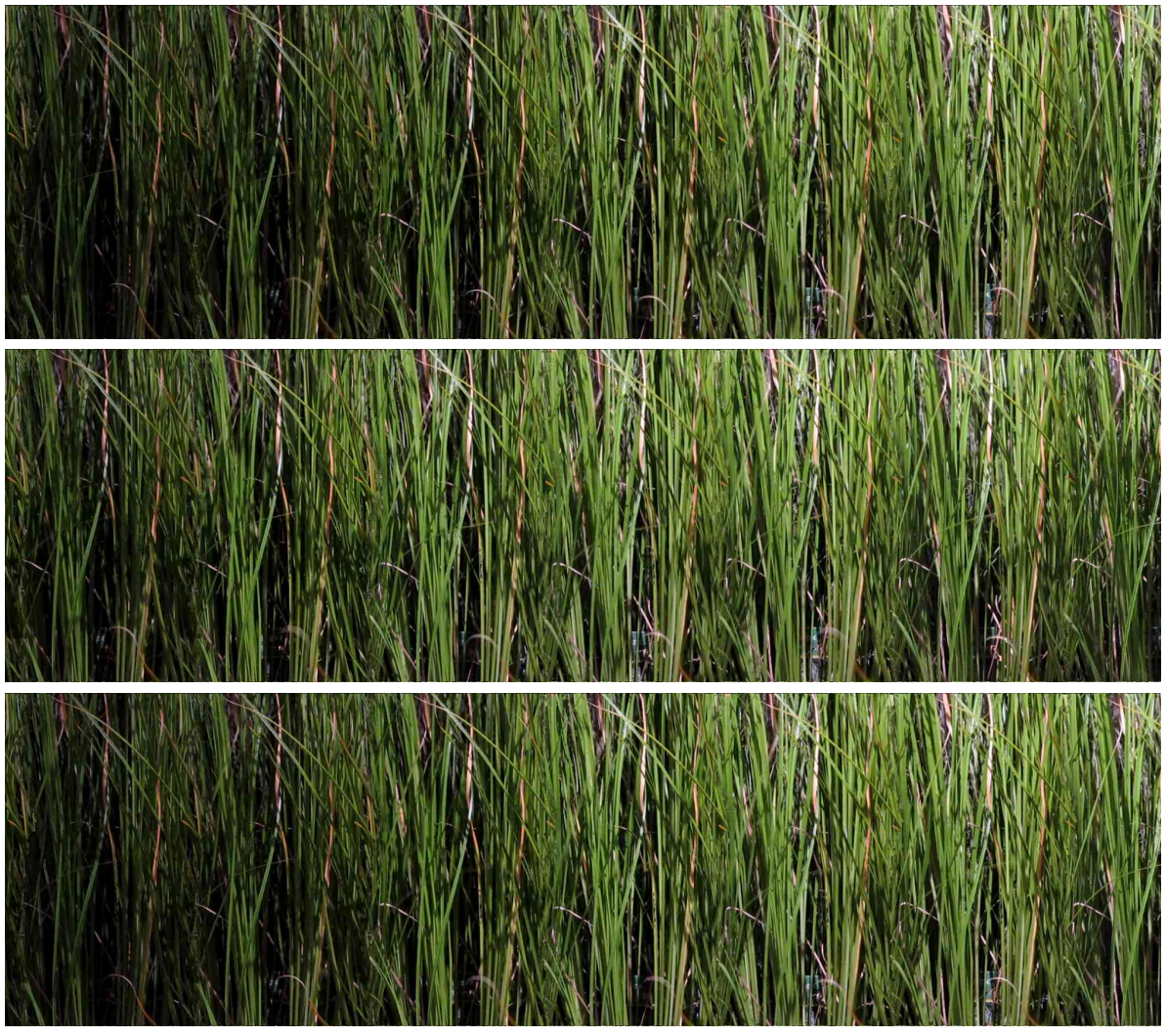
DBTF

- Změna osvětlení





DBTF - Změna osvětlení



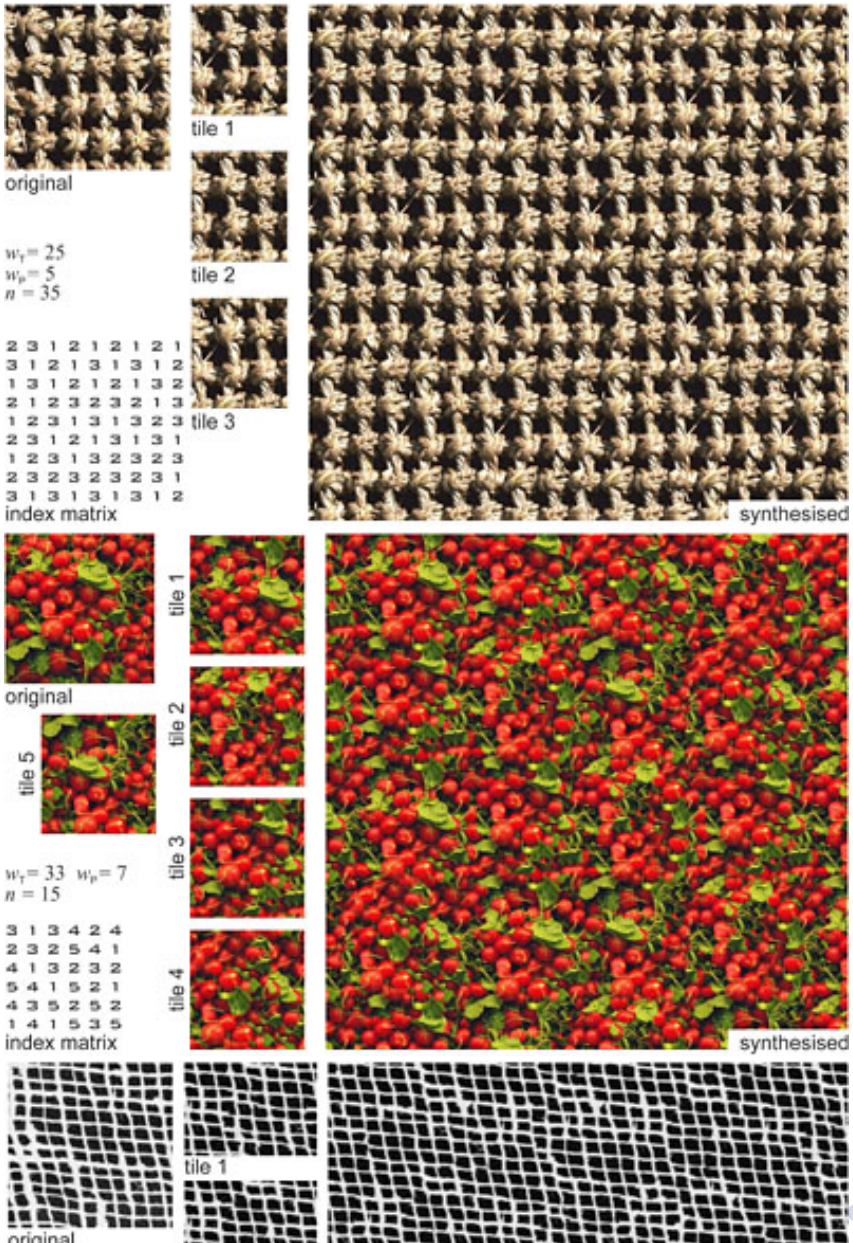
DBTF - Změna osvětlení



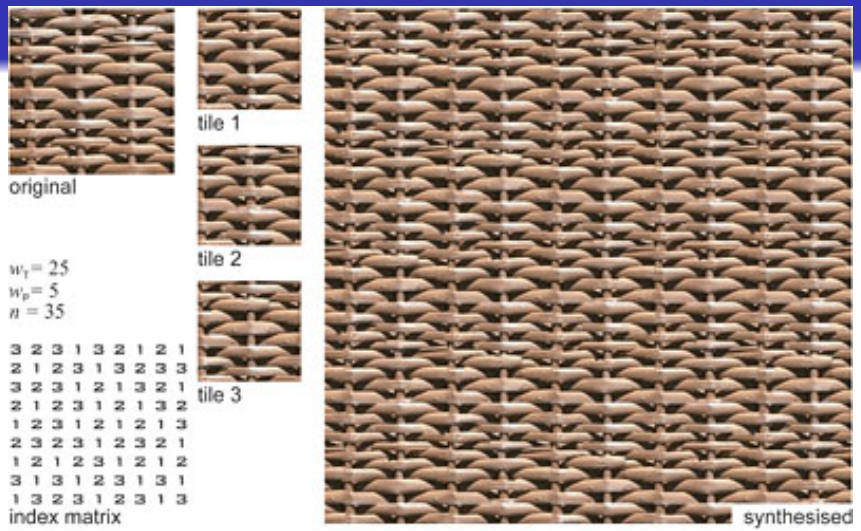
Textury

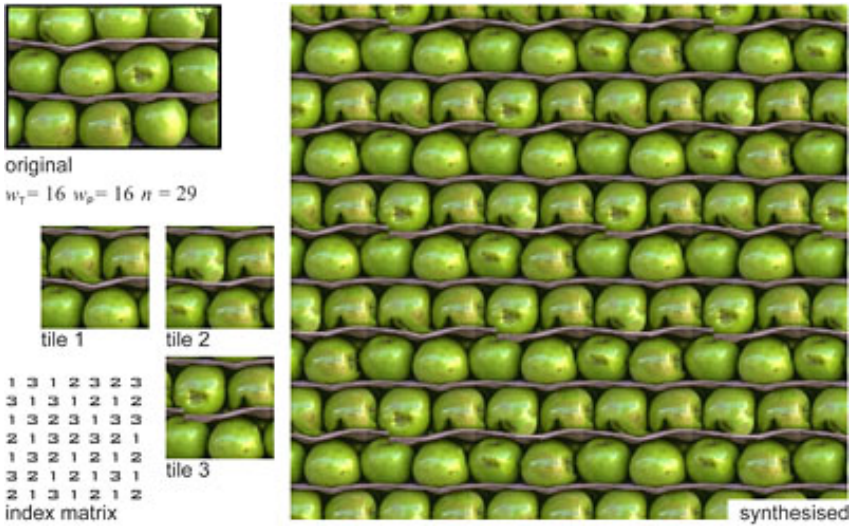
- Pokud chceme použít naměřenou texturu na libovolně velkou plochu, kolik dat potřebujeme?
  - konečný vzorek nemůže přímo pokrýt plochu libovolné velikosti
- Bezešvé textury (*tileable*)
  - jejich protilehlé okraje na sebe navazují
  - snadné u pravidelných motivů (dlaždice, látka), obtížnější u nepravidelných struktur (oblaka, kovy, tráva)
- Syntéza textur
  - pravděpodobnostní model (kouř, oheň, voda,...)
  - vzorkování, získávání frekvencí

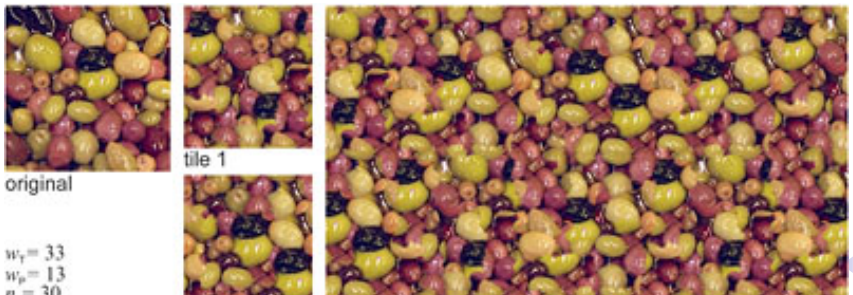
Syntéza


original
tile 1
tile 2
tile 3
$w_T = 25$
$w_p = 5$
$n = 35$
index matrix
synthesised
original
tile 5
tile 1
tile 2
tile 3
tile 4
$w_T = 33$ $w_p = 7$
$n = 15$
index matrix
synthesised
original
tile 1

Syntéza


original
tile 1
tile 2
tile 3
$w_T = 25$
$w_p = 5$
$n = 35$
index matrix
synthesised


original
$w_T = 16$ $w_p = 16$ $n = 29$
tile 1
tile 2
tile 3
index matrix
synthesised


original
tile 1
$w_T = 33$
$w_p = 13$

Shrnutí a kontrolní otázky

- BRDF modeluje směrovou odrazivost v bodě; SVBRDF ji mění s polohou.
- BTF zachycuje prostorově a směrově proměnný vzhled včetně stínění a paralaxy mikrostruktury.
- Vyšší věrnost měřeného modelu znamená náročnější snímání, ukládání a rekonstrukci.

1. Které jevy může BTF reprezentovat lépe než SVBRDF?
2. Proč nelze tabulku BTF ukládat ve všech možných směrech spojitě?
3. Co musí zachovat syntéza dynamické textury kromě vzhledu jednotlivých snímků?

Doporučené zdroje I

[1] Institute of Information Theory and Automation, CAS.
Bidirectional texture function database.
Online databáze a demonstrace měřených BTF materiálů.
Dostupné z: http://btf.utia.cas.cz/; citováno 12. 8. 2026.

[2] Matt Pharr, Wenzel Jakob, and Greg Humphreys.
Physically Based Rendering: From Theory to Implementation.
MIT Press, Cambridge, MA, 4 edition, 2023.
Dostupné z: https://pbr-book.org/4ed/.

[3] Bruce Walter, Stephen R. Marschner, Hongsong Li, and Kenneth E. Torrance.
Microfacet models for refraction through rough surfaces.
In *Proceedings of the Eurographics Symposium on Rendering*, pages 195–206.
The Eurographics Association, 2007.
Dostupné z: https://doi.org/10.2312/EGWR/EGSR07/195-206.