



1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

# Robotika

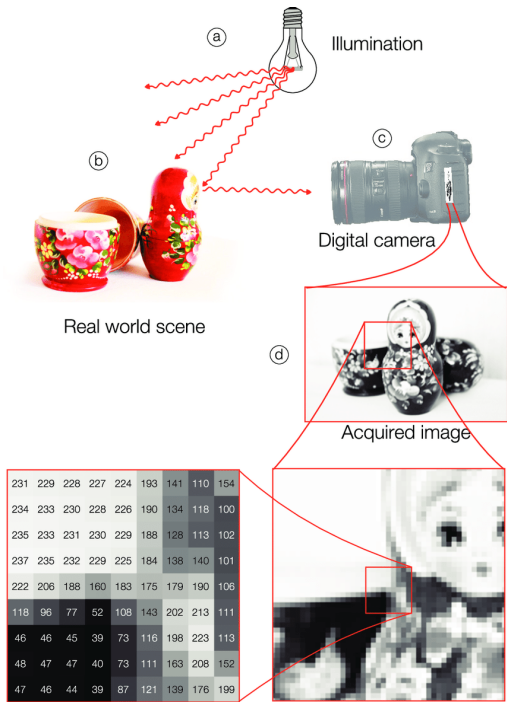
Počítačové vidění – vznik digitálního obrazu

Vladimír Smutný

Centrum strojového vnímání

Český institut informatiky, robotiky a kybernetiky (CIIRC)

České vysoké učení technické v Praze



- ◆ zdroj světla
- ◆ odraz
- ◆ prostředí (není na obrázku)
- ◆ optika
- ◆ snímač

1

2

3

4

5

6

7

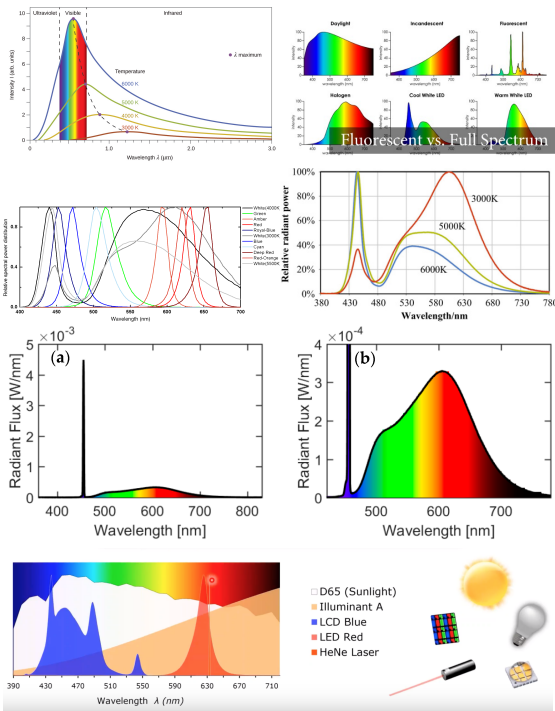
8

9

10

11

12



- ◆ Vyzařování černého tělesa – slunce, žárovka (obyčejná/halogenová), svíčka,...
- ◆ Výboj v plynech – zářivka (má lumino-for!!!), doutnavka, výbojka
- ◆ LED – barevné nebo s luminoforem
- ◆ Laser
- ◆ Luminofor

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

Vyzařování černého tělesa se řídí Planckovým zákonem, jeho spektrální složení závisí jen na teplotě tělesa. Obrázek vlevo nahoře. Sluneční fotosféra má teplotu okolo 5000 °C, obyčejná žárovka má kolem 2800 °C, halogenová cca 3300 °C. Denní osvětlení je dále modifikováno pohlcováním fotonů některých vlnových délek v atmosféře.

Zářivka (trubicová nebo kompaktní) je plněna plynem o nízkém tlaku. V něm vzniká elektrický výboj, který produkuje krátkovlnné (energetičtější, modřejší) fotony, které excitují elektrony luminoforu a luminofor pak vyzařuje červenější, víceméně spojité spektrum. Výboj v plynu produkuje fotony o vlnových délkách korespondujících rozdíly mezi energetickými hladinami elektronů příslušného plynu, a proto mají poměrně úzké spektrální čáry. Ne všechny fotony z výboje se pohltní v

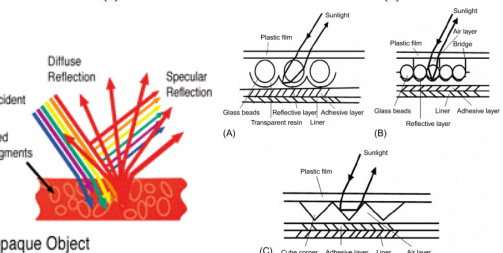
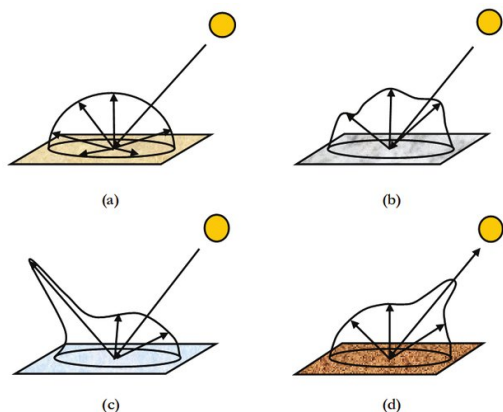
luminoforu, a proto se ve spektru zářivek objevují intenzivní čáry z původního výboje.

Vysokotlaká výbojka (dříve se používaly pro pouliční osvětlení rtuťové s modrozeleným světlem, dnes sodíkové se žlutým světlem) funguje stejně, jen s jinými plyny a lumino-fory. Některé sodíkové nemají luminofor.

Barevné LED mají relativně úzké spektrum.

Bílé LED jsou vlastně modré LED s luminoforem, který více či méně úspěšně doplňuje ostatní barvy spektra.

Laser má velmi úzké spektrum o jedné čáře, pro osvětlovací účely bývá doplněn o luminofor. V projekčních přístrojích např. pro kina je použito více laserů o různých vlnových délkách.



- ◆ Zrcadlový, např. vyleštěný nebo napařený kov
- ◆ Matný, drsný povrch
- ◆ Průhledný lesklý povrch s pigmenty
- ◆ Retroreflektivní povrch
- ◆ Luminiscenční, fosforescenční materiál



1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12

Zrcadlový odraz vzniká např. na napařených kovech na skle nebo jiném hladkém povrchu. Můžeme pozorovat buď skrz průhledné sklo (zrcadlo v koupelně) nebo přímo napařený povrch (tzv. first surface mirror), který je typicky málo odolný proti poškrábání - používá se v optických přístrojích.

Povrch, který je nerovný na délkách větších než vlnová délka světla, odráží dopadající světlo do různých směrů. Nejčastěji se modeluje jako takzvaný lambertovský povrch (viz obr. (a)), přesnější je model Orenův-Nayarův, který dobře modeluje např. písek, sádku a další zrnité povrchy. Lambertovský model je extrémním případem složitějšího Orenova-Nayarova modelu.

Povrch, který je tvořen průhledným materiálem s obsahem zrněk pigmentů, je vlastně kombinací obou předchozích extrémů (viz obr. (c)). Část světla se odrazí podle zákona odrazu na rozhraní vzduch-průhledný materiál a část projde dovnitř. Zde se odráží a pohlcuje na zrnech pigmentu. Světlo odražené od zrněk pigmentu je pak ochuzeno o pohlcené vlnové délky a má tak jiné spektrální složení než dopadající světlo. Naproti tomu světlo odražené na povrchu průhledné složky má spektrální složení prakticky stejné jako dopadající světlo. Přesněji postihují odražené světlo na povrchu Lambertovy vzorce, kde poměr dopadajícího a odraženého světla závisí na úhlu dopadu a indexu lomu pro danou vlnovou délku. Složky světla odraženého na povrchu a odraženého

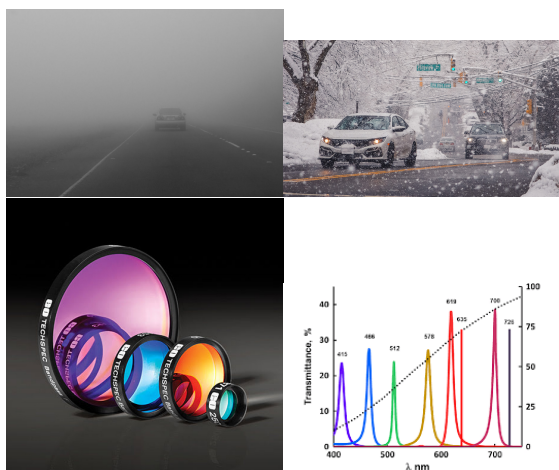
od částic uvnitř materiálu je možné oddělit za určitých okolností i v pozorovaném součtu těchto složek. Tyto povrchy jsou v praxi poměrně běžné, například porcelán a glazovaná keramika, barevné plasty, lesklé nátěry a podobně.

Na obr. (d) je naznačen příklad částečně retroreflektivního a částečně difuzního povrchu. Příkladem jsou reflexní prvky na oděvech, dopravním značení a podobně.

V obrázcích (c) a (d) je poměr lesklého/retroreflektivního a difuzního odrazu dost nerealistický, lesklý/retro odraz je typicky natolik silný, že nejde rozumně zakreslit.

Retroreflektivní, zpět odražející, materiály jsou tvořeny buď malými koutovými odražeči (tři navzájem kolmé zrcadlové roviny) nebo kuličkami. Koutové odražeče se v makroskopické variantě (rozměry cca jednotky milimetrů) používaly především dříve, dnes se pro samolepky a nášivky používají především kuličky zatavené do průhledného plastu. Velké koutové odražeče se používají např. v měření vzdáleností (ve spojení s laserovými interferometry) nebo pro radiové vlny, např. na bójích.

Speciální kategorií jsou aktivní povrchy fluorescenční či fosforescenční, které dopadlé světlo mění na excitaci elektronů v obalech atomů a vyzařují ho na jiných vlnových délkách. Jde např. o speciální nátěry, zvýrazňovací fixy, materiály bezpečnostních vest a podobně.



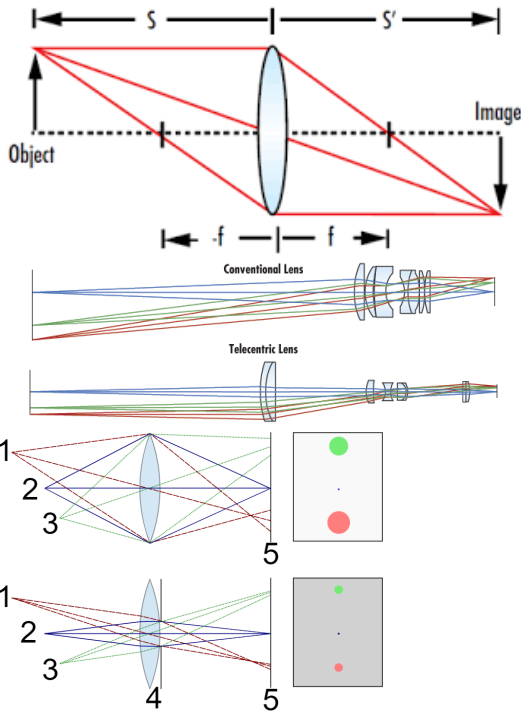
- ◆ Mlha, déšť, sněžení, smog, prach,...
- ◆ Optické barevné filtry, sluneční brýle,...
- ◆ Interferenční filtry
- ◆ Polarizační filtry,...
- ◆ Mřížky, efektové filtry,...

Mohou měnit směr chodu paprsků (déšť), zeslabovat intenzitu (prach) i spektrální složení (barevné filtry).

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12

Například atmosféra rozptyluje více modrou část spektra, proto je jasná obloha modrá (rozptýlené paprsky) a zapadající slunce červené (paprsky přímo od slunce procházející tlustou vrstvou atmosféry).

Z barevných (měnících jen spektrální složení) optických filtrů jsou zajímavé interferenční filtry, které umožňují velmi přesně vybrat jen úzké spektrum vlnových délek. Vhodné jsou zvláště v použití s lasery.



- ◆ Objektivy s centrálním promítáním
- ◆ Telecentrické objektivy (střed promítání v nekonečnu)
- ◆ Dalekohledy
- ◆ Mikroskopy
- ◆ Zoom

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12

Pro většinu praktických potřeb nám stačí Newtonův vzorec pro tenkou čočku.  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Lens#Imaging\\_properties](https://en.wikipedia.org/wiki/Lens#Imaging_properties)

1

2

3

4

5

6

7

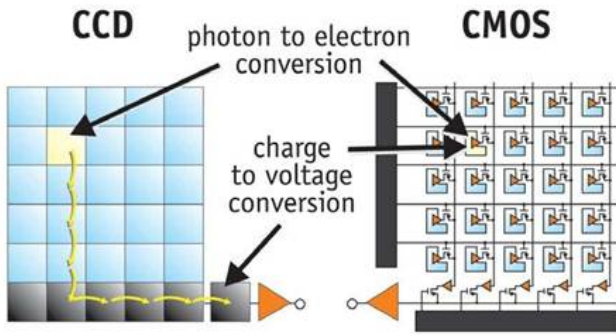
8

9

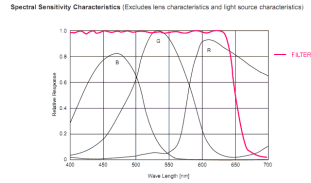
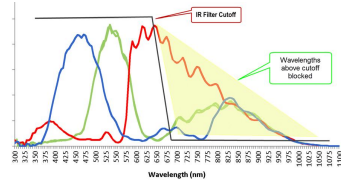
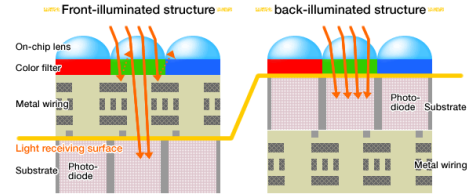
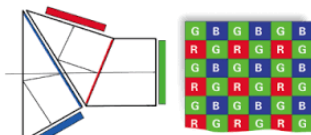
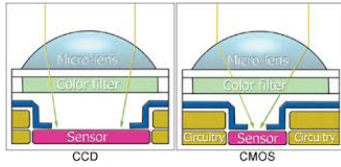
10

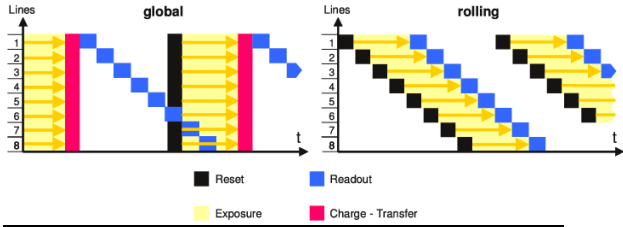
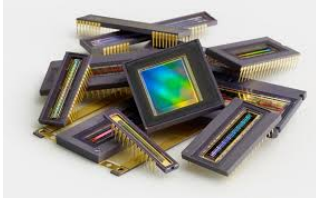
11

12

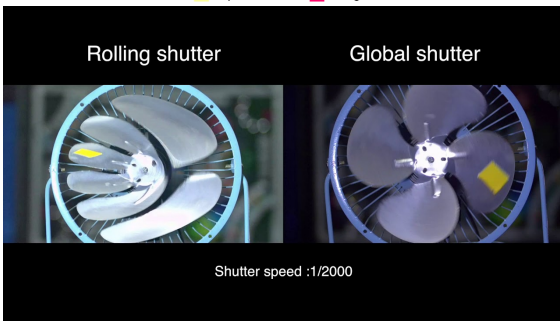


- ◆ CCD, CMOS, mikrobolometr (termokamery),...
- ◆ Černobílý, barevný, multispektrální





- ◆ Plošné, řádkové
- ◆ Rolling vs. global shutter



1

2

3

4

5

6

7

8

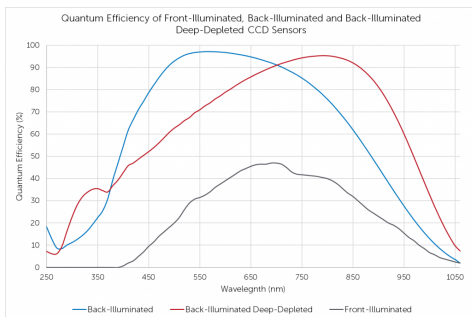
9

10

11

12





- ◆ Spektrální citlivost snímače (spectral quantum efficiency)
- ◆ Počet pixelů, velikost pixelu, velikost čipu
- ◆ Přenosová kapacita (bandwith) rozhraní
- ◆ Maximální snímková frekvence
- ◆ Kapacita pixelu (full-well capacity)
- ◆ Šum (SNR)

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12

Počet pixelů je od několika set tisíc po řádově desítky Mpx až malé stovky Mpx.

Přenosová kapacita rozhraní je spíše vlastnost kamery. Dnes se používá Ethernet (1 Gb/s, 10 Gb/s), USB 3, Camera Link, CoaxPress,... Shora omezuje, kolik snímků za sekundu s jakým rozlišením je možné přenést.

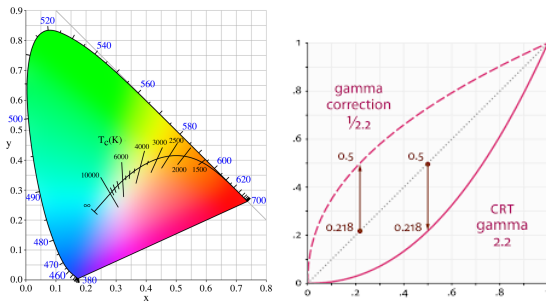
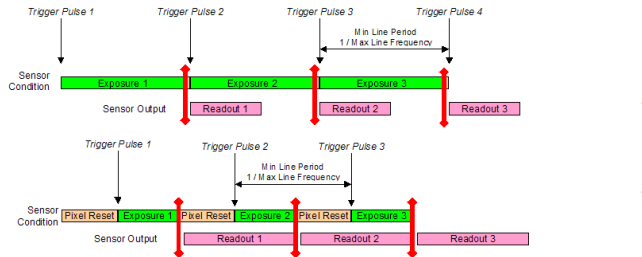
Typicky jeden foton generuje jeden elektron (s nějakou pravděpodobností menší než 1), viz obrázek. Full-well capacity je maximální hodnota, kterou je jeden pixel schopen uchovat během jedné expozice. Účinnost přeměny fotonů na pixel klesá se stoupajícím zaplněním kondenzátoru, do jaké hodnoty je vztah lineární, který je důležitý např. v kamerách pro strojové vidění, závisí na typu snímače, ale odhadem tak do dvou třetin kapacity pixelu. Od toho se odvíjí maximální signal-to-noise ratio, které lze přímo spočítat. Dopadající fotony světla se řídí Poissonovým rozdělením. Při kapacitě např. 40 000 elektronů, je lineární část řekněme do 25 000 elektronů. Směrodatná odchylka je pro Poissonovo rozdělení odmocnina z počtu elektronů.

$$SNR = 20 \log_{10} \sqrt{w} = 20 \log_{10} \sqrt{25000} \doteq 44dB$$

To je ve srovnání se senzory jiných veličin velmi málo. Proto se obrazy nejčastěji kvantizují do 8 bitů, profesionální velkoformátové fotoaparáty, tzv. stěny mají platných 12-13 bitů. S tímto omezením se nedá nic dělat, jde o fyzikální povahu světla. Jde o takzvaný photon nebo shot noise.

Významným zdrojem šumu v obraze je takzvaný temný proud (dark current), který se dá odhadnout ze snímku, kdy zakryjeme objektiv. Je také poissonovský, vzniká tak, že v závislosti na kvalitě výroby konkrétního pixelu se v pixelu objevují náhodné elektrony. Je přímo úměrný času expozice a dá se ovlivnit chlazením čipu např. Peltierovým chlazením, klesá na polovinu při ochlazení o každých cca 7 – 8°C. Je různý pro různé pixely, pixely zasažené touto výrobní vadou nejvíce se nazývají horké pixely. Ve spotřební elektronice se jejich hodnota ignoruje a dopočítává z okolních pixelů.

Dalšími zdroji šumu jsou šумы v zesilovači a v AD převodníku.



- ◆ Expoziční čas
- ◆ Zesílení, AGC
- ◆ Vyvážení bílé, AWB
- ◆ Gamma korekce
- ◆ Oblast zájmu

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12



$$U = \int I(\lambda)\rho(\lambda)f(\lambda)s(\lambda)d\lambda$$
$$U_i = \int I(\lambda)\rho(\lambda)f_i(\lambda)s(\lambda)d\lambda \quad i \in \{R, G, B\}$$

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12