

# Digitální obraz (pro fotografii), základní pojmy

Václav Hlaváč

České vysoké učení technické v Praze

Český institut informatiky, robotiky a kybernetiky

160 00 Praha 6, Jugoslávských partyzánů 1580/3

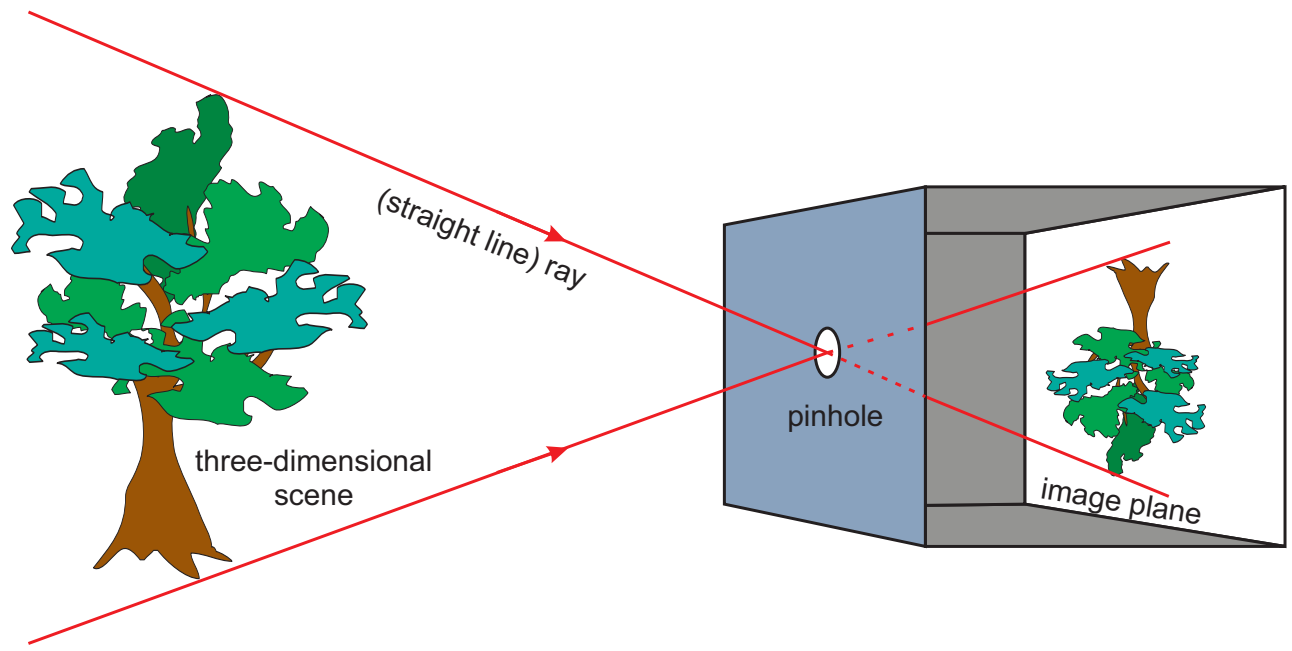
<http://people.ciirc.cvut.cz/hlavac>, [vaclav.hlavac@cvut.cz](mailto:vaclav.hlavac@cvut.cz)

## Osnova přednášky:

- ◆ Obraz, perspektivní zobrazení.
- ◆ Obrazová funkce  $f(x, y)$ .
- ◆ Digitalizace obrazu: vzorkování + kvantování.
- ◆ Vzdálenost v obrazu, okolí pixelu.
- ◆ Relace souvislosti, oblast, konvexní oblast.
- ◆ Vlastnosti celého obrazu: histogram jasu, jas, kontrast, barevná sytost, ostrost.

# Obraz

- ◆ **Obraz** je chápán intuitivně jako vjem na sítnici lidského oka, obraz na světlocitlivém čipu, TV kameře, ...
- ◆ Obraz je často pořizen pomocí **perspektivní projekce** shodující se s intuitivním modelem dírkové komory.



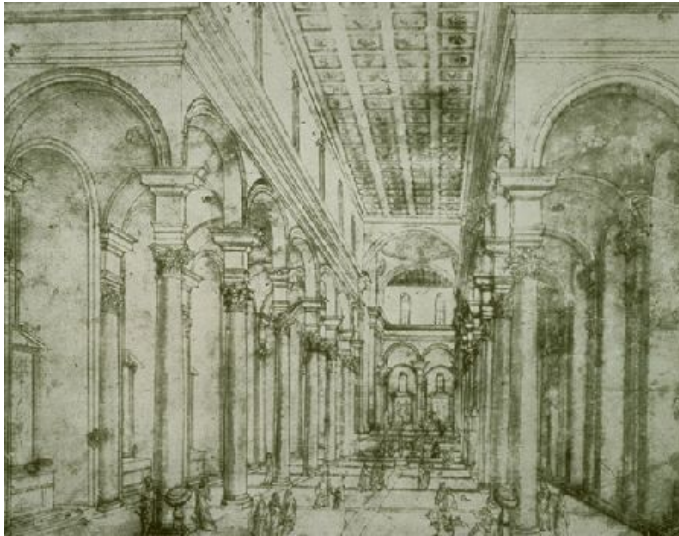
Konvence:  
Uvažujeme směr světla  
zleva doprava.

# Perspektivní zobrazování započalo v italském renesančním malířství



3/41

Filippo Brunelleschi vytvořil kresbu v perspektivě, aby ukázal zákazníkům, jak bude vypadat kostel Santo Spirito ve Florencii.



Kresba z  $\approx$ 1420



Pohled do kostela postaveného 1434-82

Poděkování za obrázky: Khan Academy

# Ukázka praktické perspektivy ze 16. století



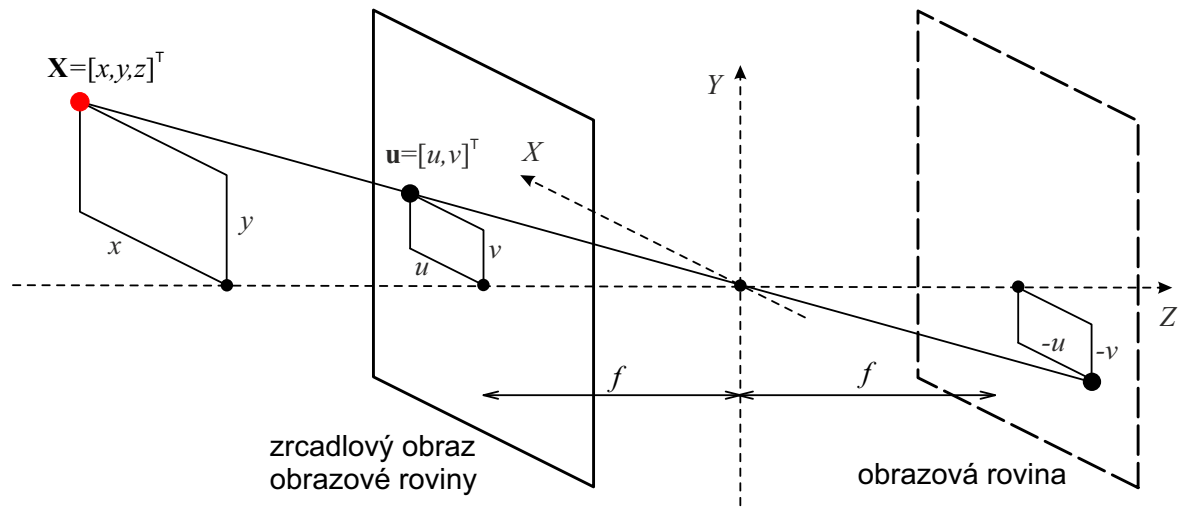
4/41



Albrecht Dürer: Ležící žena, dřevoryt, 1525

# Obrazová funkce

- ◆ Obrazová funkce se označuje  $f(x, y)$ ,  $f(x, y, t)$ . Je výsledkem perspektivního zobrazení, které vyjadřuje geometrickou stránku věci. 5

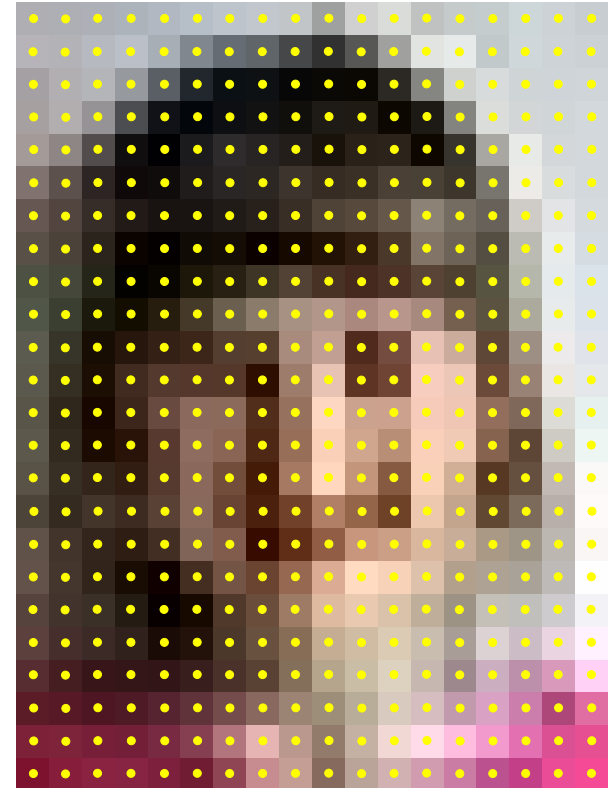
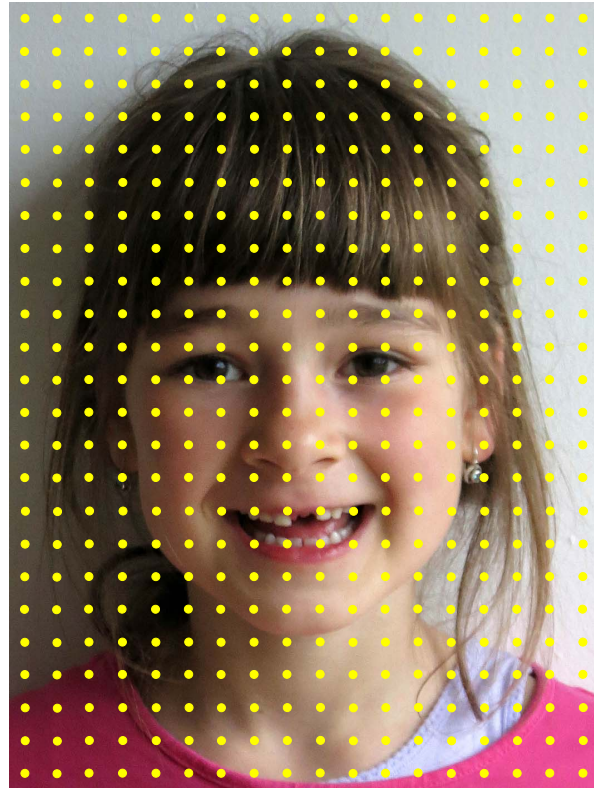


- ◆ Při uvažování podobných trojúhelníků:  $u = \frac{x f}{z}$ ,  $v = \frac{y f}{z}$ . Místo odvozené 2D obrazové funkce  $f(u, v)$  se obvykle používá značení  $f(x, y)$ .
- ◆ Hodnota obrazové funkce odpovídá barvě/jasu 3D bodu (znázorněnému v obrázku červenou tečkou) v příslušném místě ve scéně, který je perspektivně promítnut.

## Spojité obraz a jeho matematické vyjádření

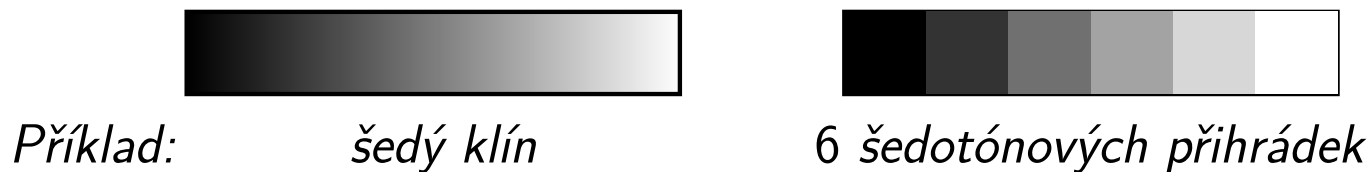
- ◆ Spojitý **obraz** = vstup (chápáno intuitivně), např. na sítnici oka nebo sejmutý TV kamerou.
- ◆ Pro jednoduchost předpokládejme šedotónový obraz.
- ◆ Spojitá **obrazová funkce**  $f(x, y)$ . *Později po digitalizaci matice obrazových elementů, pixelů.*
- ◆  $(x, y)$  jsou **prostorové souřadnice** pixelu; rozuměj souřadnice v rovině.
- ◆  $f(x, y, t)$  v případě **obrazové sekvence** je  $t$  čas.
- ◆  $f(x, y)$  je **hodnota obrazové funkce**, obvykle úměrná jasu, optické hustotě u průhledných předloh, vzdálenosti od pozorovatele, teplotě v termovizi, atd.
- ◆ (Přirozeně) **2D obrazy**: Tenký vzorek v optickém mikroskopu, obrázek písmene na listu papíru, otisk prstu, jeden řez z počítačového tomografu, atd.

# Pixely odpovídají vzorkům (nikoliv malým čtverečkům)



# Digitalizace

- ◆ Digitalizace = vzorkování & kvantizace hodnoty obrazové funkce (též intenzity).
  - Vzorkování vybere ze spojitě obrazové funkce vzorky. Výsledkem jsou vzorky v diskrétním rastru (je jich konečný počet). Hodnota vzorku zůstává “spojitá”, tj. reálné číslo.
  - Kvantování rozdělí reálnou hodnotu vzorku na konečný počet hodnot (též přihrádek). U šedotónového obrazu např. na 256 hodnot.



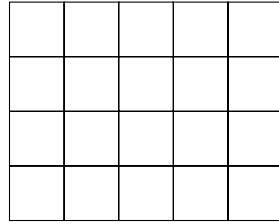
- 
- ◆ Digitální obraz se obvykle reprezentuje maticí.
  - ◆ Pixel = akronym, angl. picture element.



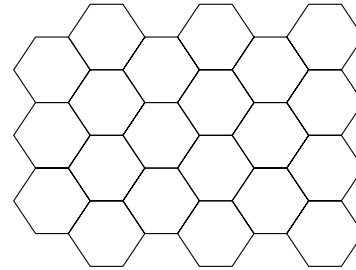
# Vzorkování obrazu

Vzorkování obrazu zahrnuje dvě úlohy:

1. **Vzor pro vzorkování** (=uspořádání vzorkovacích bodů do pravidelného rastru).



(a)

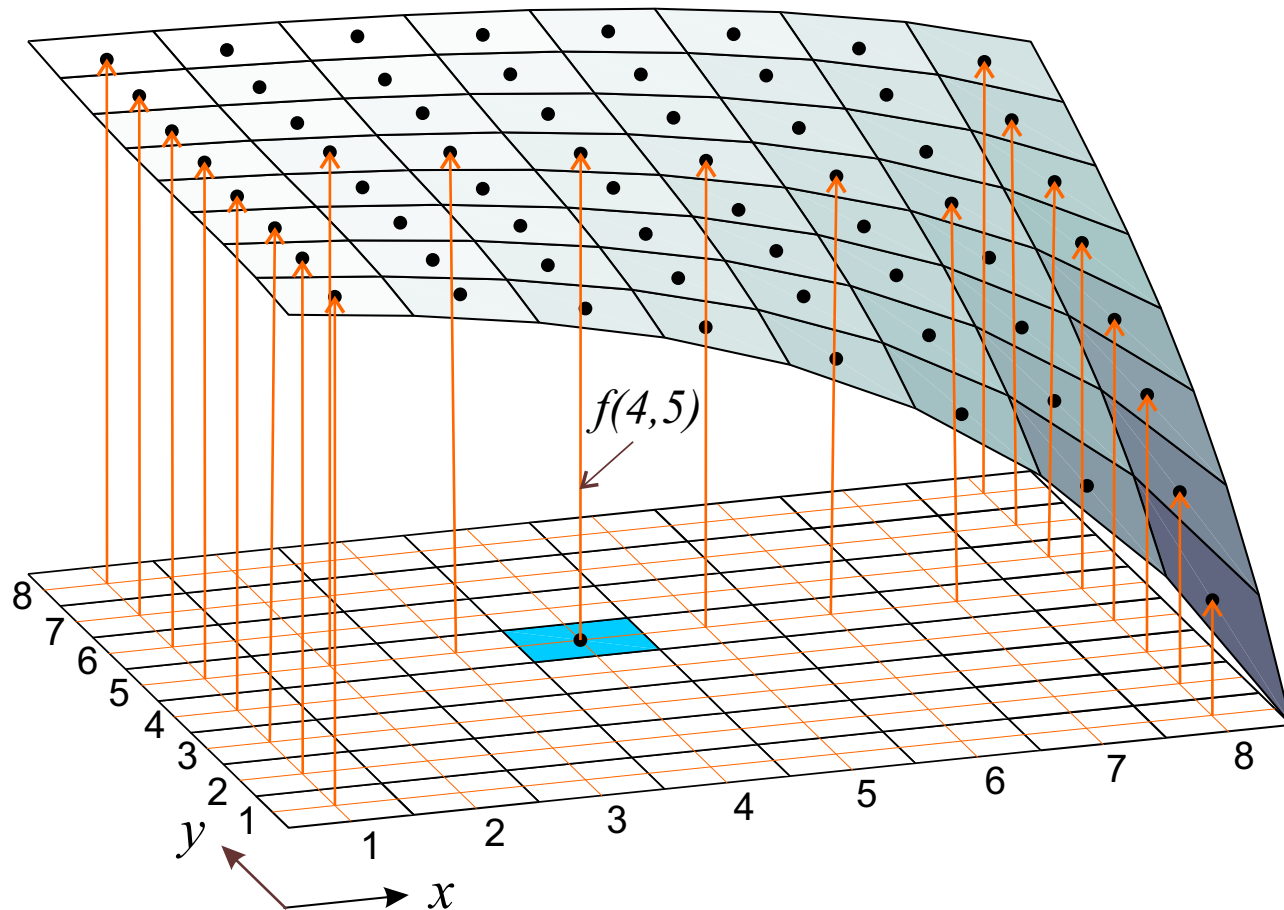
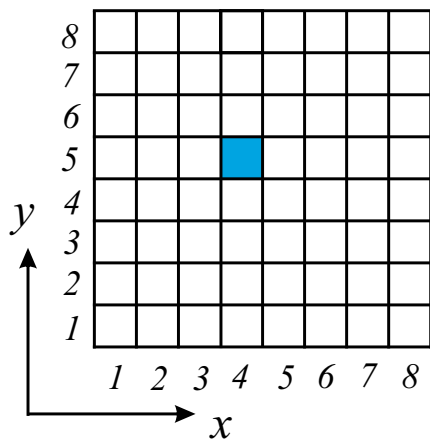


(b)

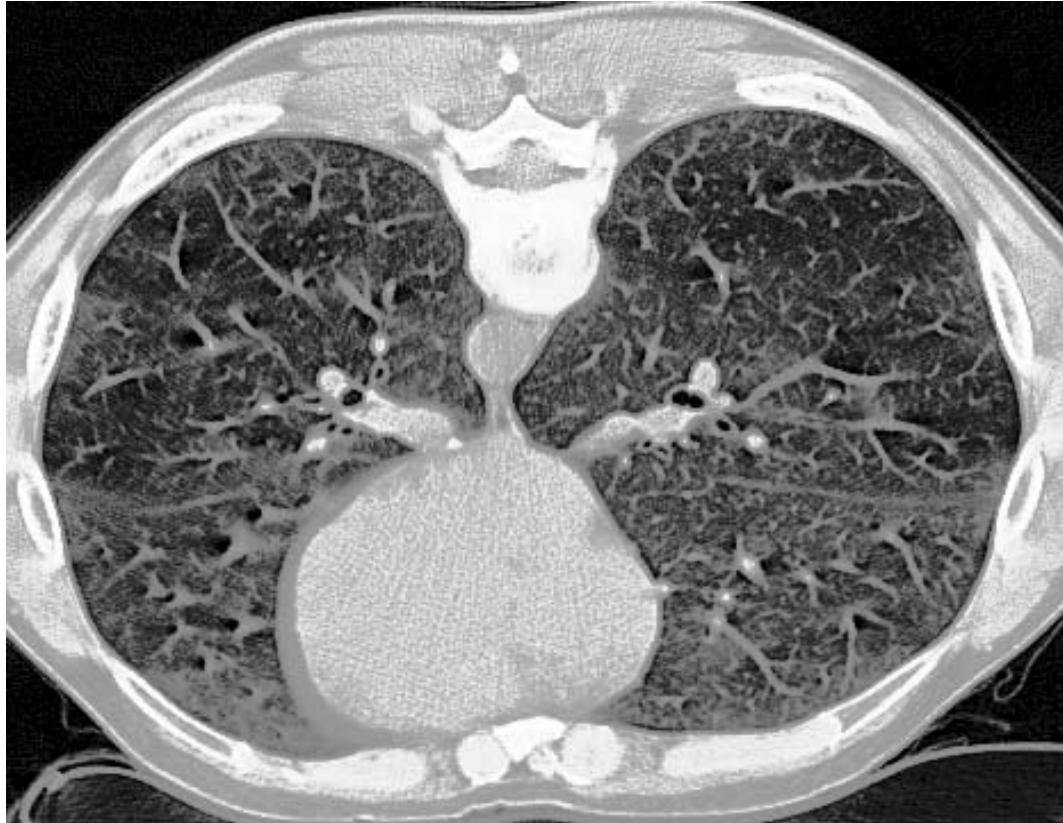
2. **Rychlost/vzdálenost vzorkování** (vyjadřuje Nyquist-Shannonova věta o vzorkování).

- ◆ **Vzorkovací frekvence musí být  $2 \times >$  než maximální frekvence v signálu**; což je nejvyšší frekvence rekonstruovatelná z vzorkovaného signálu. Větu odvodíme, až budeme umět Fourierovu transformaci.
- ◆ V obrazech se musí velikost vzorku (pixelu) být dvakrát menší než nejmenší detail, který chceme zaznamenat.

# Vzorkování obrazu, ilustrace



**Příklad digitálního obrazu  
jeden řez z rentgenového tomografu**



## První scanner obrazu, 1957



The SEAC Scanner  
with control console in background



Prvním skenovaným obrázkem bylo dítě R. Kirsche.

Použil dva prahy a získal tři jasové úrovně.

Russell Kirsch (\*1929-†2020), SEAC and the start of image processing at the National Bureau of Standards. In: Annals of the history of computing, IEEE, vol. 20 (1998), p 7-13.

## Vzorkování, příklad 1



Original  $256 \times 256$



$128 \times 128$

## Vzorkování, příklad 2



Originál  $256 \times 256$

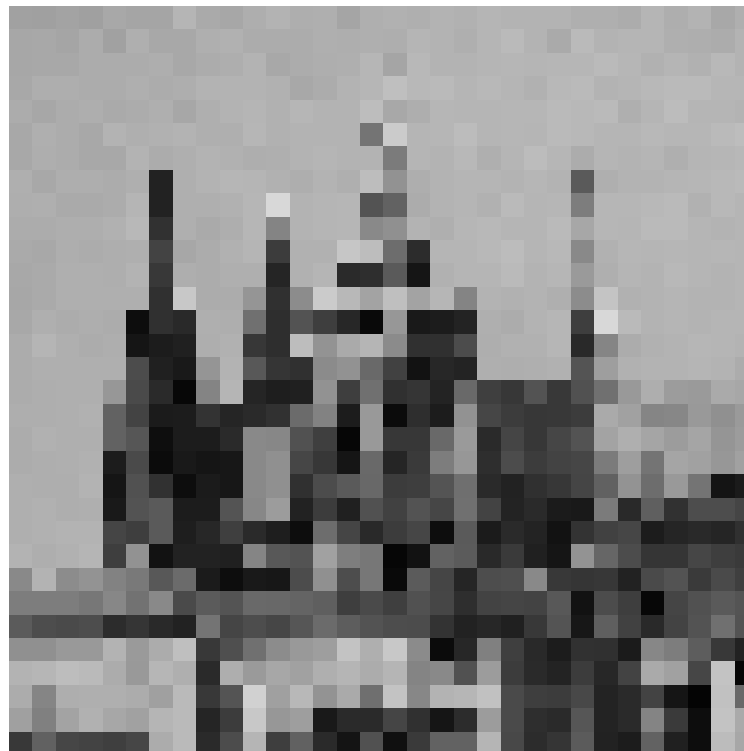


$64 \times 64$

## Vzorkování, příklad 3



Originál  $256 \times 256$



$32 \times 32$

# Kvantování, příklad 1



Originál 256 jasových úrovní



64 jasových úrovní



## Kvantování, příklad 2



17/41



Originál 256 jasových úrovní



16 jasových úrovní

## Kvantování, příklad 3



Originál 256 jasových úrovní



4 jasové úrovně

## Kvantování, příklad 4 (binární obraz)



19/41



Originál 256 jasových úrovní



2 jasové úrovně

# Vzdálenost, matematicky



Funkce  $D$  se nazývá **vzdáleností**, právě když

$$D(p, q) \geq 0, \quad \text{speciálně } D(p, p) = 0 \text{ (identita).}$$
$$D(p, q) = D(q, p), \quad \text{(symetrie).}$$
$$D(p, r) \leq D(p, q) + D(q, r), \quad \text{(trojúhelníková nerovnost).}$$

# Několik definic vzdálenosti ve čtvercové mřížce

Euklidovská vzdálenost

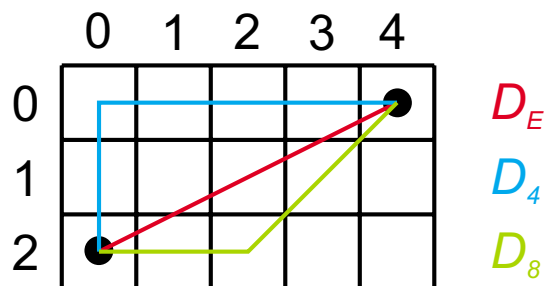
$$D_E((x, y), (h, k)) = \sqrt{(x - h)^2 + (y - k)^2} .$$

Vzdálenost městských bloků (též vzdálenost na Manhattanu)

$$D_4((x, y), (h, k)) = |x - h| + |y - k| .$$

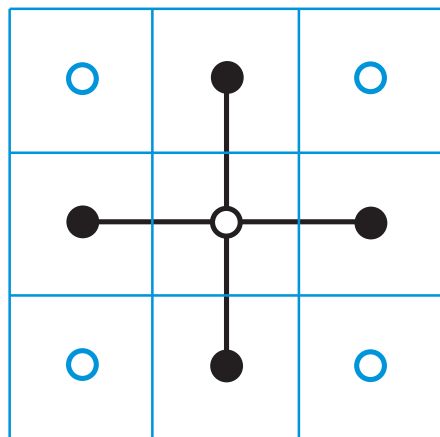
Vzdálenost na šachovnici (z pohledu šachového krále)

$$D_8((x, y), (h, k)) = \max\{|x - h|, |y - k|\} .$$

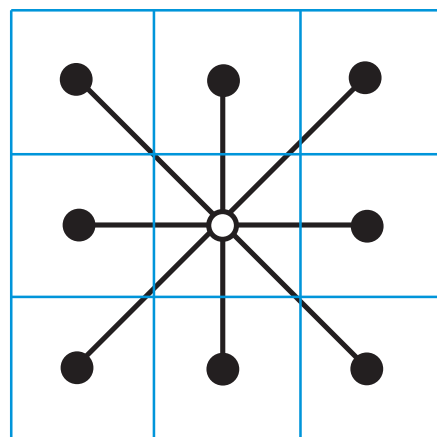


# Čtyř, osmi a šesti okolí

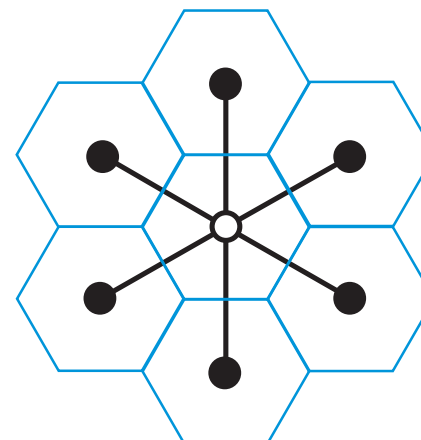
Množina složená ze samotného pixelu (uprostřed, nazývaný reprezentativní pixel nebo reprezentativní bod) a jeho susedé ve vzdálenosti 1.



4-okolí

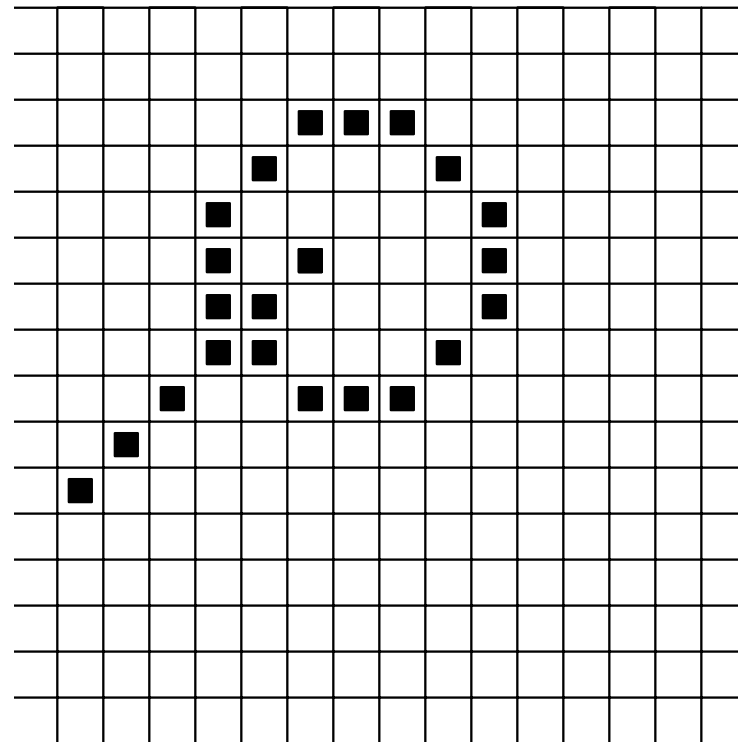
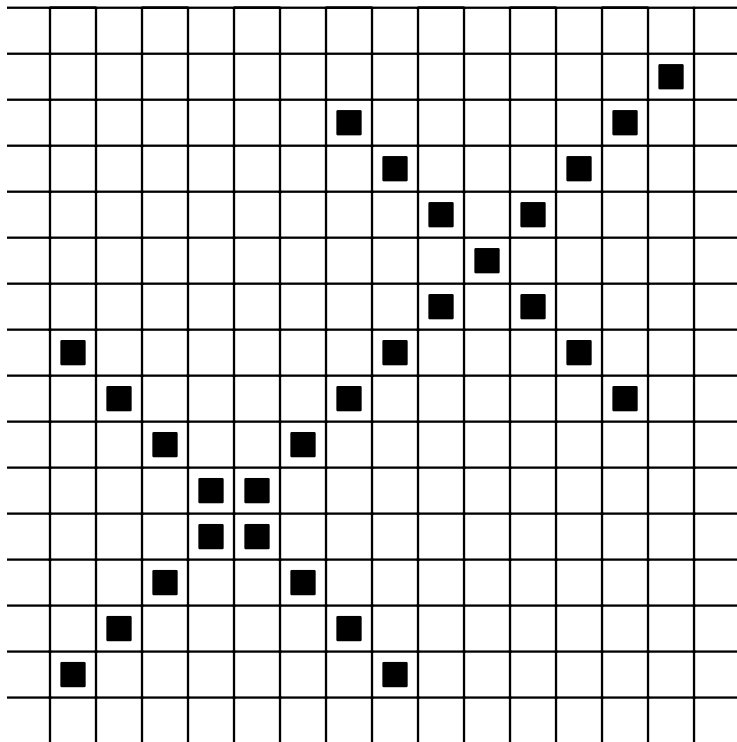


8-okolí



6-okolí

# Paradox protínajících se úseček



## Binární obraz & relace “být souvislým”



černá ~ objekty  
bílá ~ pozadí

- ◆ *Poznámka pro zvědavé. Japonský kanji znak znamená “blízko odtud”.*
- ◆ Zavedení pojmu “objekt” umožňuje vybrat ty pixely v mřížce, které mají nějaký význam. Vzpomeňme, na diskusi o interpretaci. V našem příkladě černé pixely patří objektu (objektům) – zde písmenu.
- ◆ Sousední pixely jsou souvislé.
- ◆ Dva pixely jsou souvislé, když mezi nimi existuje cesta složená ze souvislých pixelů.



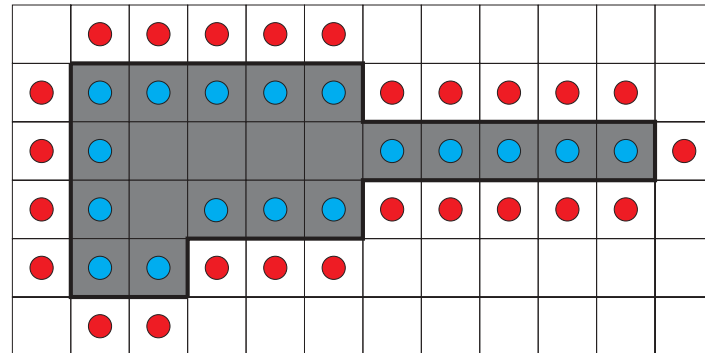
## Oblast = souvislá množina

- ◆ Relace ‘ $x$  je souvislé s  $y$ ’ je
  - reflexivní,  $x \sim x$ ,
  - symetrická  $x \sim y \implies y \sim x$  and
  - transitivní  $(x \sim y) \& (y \sim z)$ $\implies x \sim z$ . Tudíž je ekvivalencí.
- ◆ Relace ekvivalence rozkládá množinu na podmnožiny, kterým se říká třídy ekvivalence. V našem zvláštním případě relace “být souvislým” jsou třídami ekvivalence do oblastí.
- ◆ Na obrázku jsou jednotlivé oblasti označeny různými barvami.



# Hranice oblasti

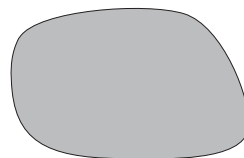
- ◆ **Hranice oblasti** je množina pixelů oblasti majících alespoň jednoho souseda nepatřícího do oblasti.
- ◆ Spojitá obrazové funkce  $\Rightarrow$  nekonečně tenká hranice.
- ◆ V digitálním obraze má hranice konečnou tloušťku. Je nutné rozlišovat **vnitřní** a **vnější hranici**.



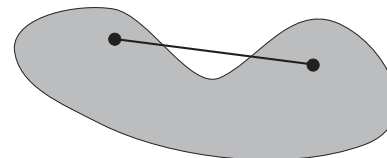
- ◆ Pozor na terminologii:  
Hranice oblasti (border)  $\times$  hrana (edge), tj. gradient obrazové funkce  $\times$  hranový bod (edgel),  
tj. místo s významnou velikostí gradientu.

# Konvexní množina, konvexní obal

Konvexní množina = její každé dva body lze spojit úsečkou ležící uvnitř množiny.



konvexní



nekonvexní

---

Konvexní obal, jezero, záliv.



Region



Convex  
hull



Lakes  
Bays

# Vlastnosti obrazu používané při jeho hodnocení/vylepšování



28/41

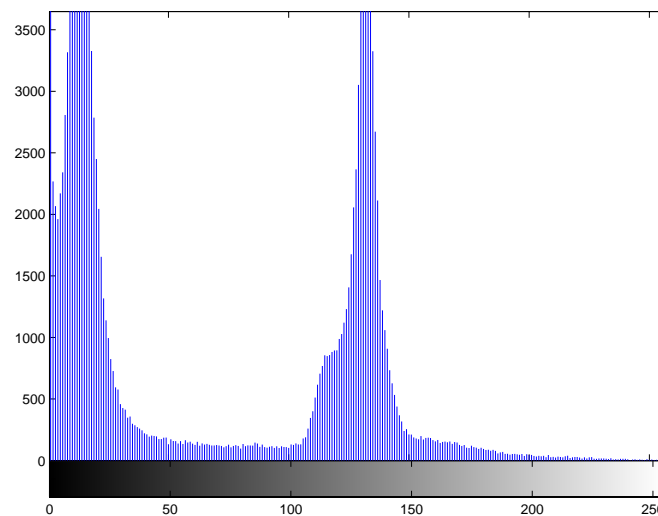
- ◆ Pro zpracování nebo vylepšování obrazu, ať člověkem nebo strojem, je potřebné obraz posoudit na základě jeho vlastností.
- ◆ Když se na obraz dívá člověk, je jeho vnímání obrazu závisí na složitém zpracování/interpretaci obrazu v mozku navíc ovlivněném **iluzemi**.
- ◆ Těmto složitostem se často pragmaticky vyhýbáme. Vhodnost obrazu pro pozorování člověkem si obvykle podstatně zjednodušujeme na
  - jednu objektivní vlastnost – **histogram obrazu** a
  - čtyři subjektivní/objektivní vlastnosti obrazu: **jas**, **kontrast**, **barevnou sytost** a **ostrost**.

## Histogram hodnot jasu obrazu

- ◆ Uvažujme nejdříve šedotónový obraz. V příkladu níže použijeme snímek řezu lidskou hrudí z počítačového tomografu. Histogram obrazu lze zobecnit na barevné obrazy. Histogramy se vyjádří nezávisle ve třech barevných složkách, např. RGB.
- ◆ Histogram hodnot jasu je odhadem hustoty pravděpodobnosti jevu, že pixel bude mít určitou jasovou hodnotu.



výchozí obraz



histogram hodnot jasu

## Vlastnosti obrazu z hlediska vnímání člověkem

- ◆ Když člověk pozoruje obrázek, jeho vnímání je ovlivněno složitým zpracováním/interpretací vjemů v mozku a souvisejícími **iluzemi**.
- ◆ My se této složitosti pragmaticky vyhneme. Vhodnost obrazu pro pozorování člověkem se často zjednodušuje na čtyři vlastnosti obrazu, kterými jsou:
  - jas,
  - kontrast,
  - barevná sytost (přírozně jen pro barevné obrazy),
  - ostrost.



## Jas, kontrast, barevná sytost a ostrost v obraze

- ◆ **Jas obrazu** charakterizuje celkovou jasnost nebo tmavost obrazu.
- ◆ **Kontrast obrazu** charakterizuje rozdíl (odlišení) mezi jasnem/barvou objektů nebo oblastí v obraze. Například sněžná liška na sněhu má nízký kontrast a tmavý pes na sněhu má vysoký kontrast.
- ◆ **Barevná sytost obrazu** je podobná vlastnost jako kontrast s tím, že místo zvětšování odlišnosti objektů/oblastí v šedotónové reprezentaci obrazu, se uvažuje odlišení objektů/oblastí v barevném vyjádření.
- ◆ **Ostrost obrazu** je definovaná jako kontrast hran, tj. ve směru gradientu jasu obrazu. Když zvýšíme ostrost, zvýšíme kontrast jen blízko hran, a to úměrně velikosti gradientu. V málo se měnících částech obrazu hodnotu obrazové funkce měníme méně.

*Pro představu použijeme analogii (obraz)  $\leftrightarrow$  (krajina) neboli (hodnota jasu)  $\leftrightarrow$  (výška v krajině v příslušném místě). Potom ostření zvětší sklon svahů, a to u více strmých svahů a méně u pozvolných svahů.*

# Směrem k vylepšování jednoho obrazu



- ◆ Nyní uvažujme **častý praktický úkol**. Máme jeden digitální vyfotografovaný obraz, s jehož vzhledem nejsme spokojeni a což se projevuje v jas, kontrastu, barevné sytosti nebo ostrosti obrazu.
- ◆ Příčinou může být, že **osvětlení scény** nebylo vhodné, nedostačoval **dynamický rozsah snímáče**, **objekty se nedostatečně odlišovaly** od pozadí, atd.
- ◆ **Člověk** často dodatečně **upravuje** právě jas, kontrast, barevnou sytost nebo ostrost obrazu již vyfotografovaný digitální snímek v počítači, např. ve PhotoShopu.
- ◆ Ukažme si potřebu hodnocení/vylepšování obrazu **na praktických ilustračních příkladech**.



## Představme snímek použitý v experimentech

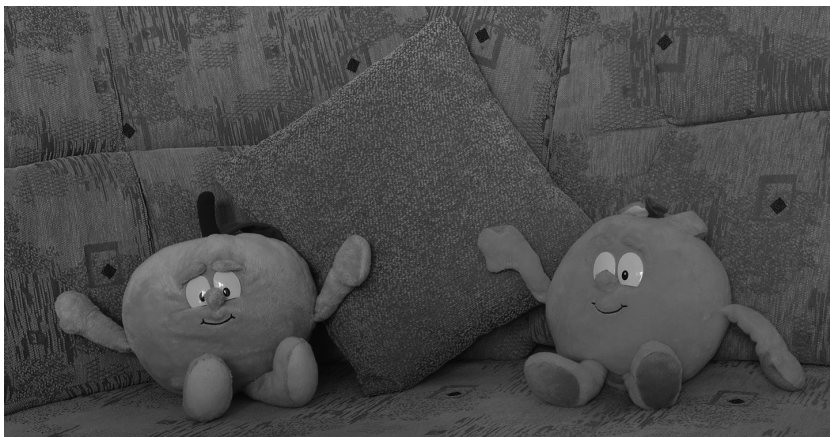
Výchozí barevný snímek tří objektů na pozadí zelené pohovky jsem vyfotografoval záměrně tak, aby ukazoval barevně málo odlišený objekt (čtvercový polštář) od pozadí a obsahoval dva barevně odlišné objekty, plyšové figurky, jednu figurku jinak zelenou a druhou oranžovou.



## Začneme šedotónovými obrázky, konverze

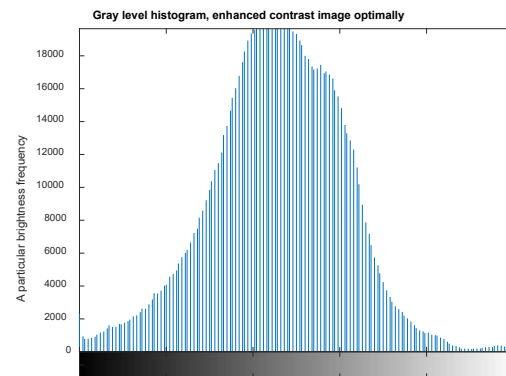
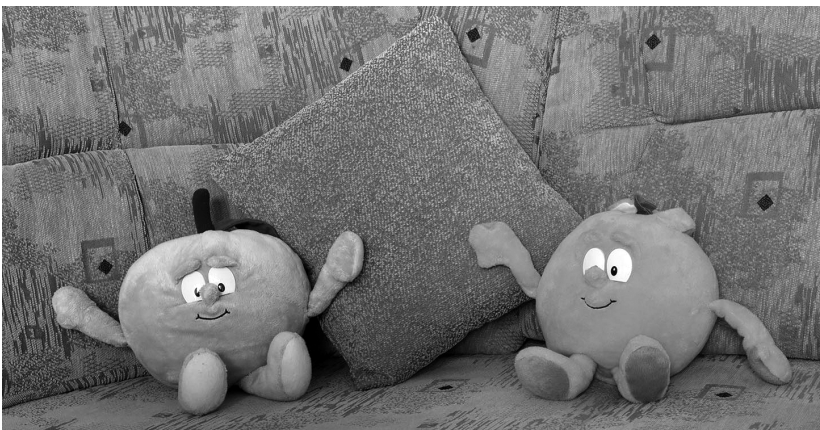
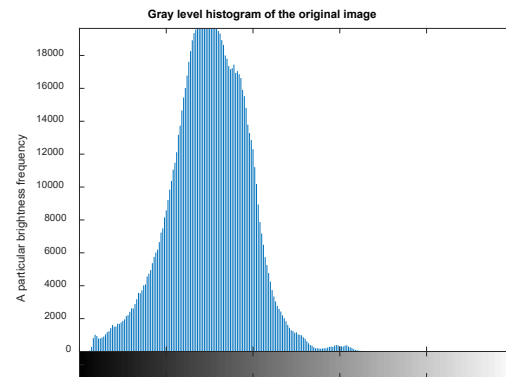
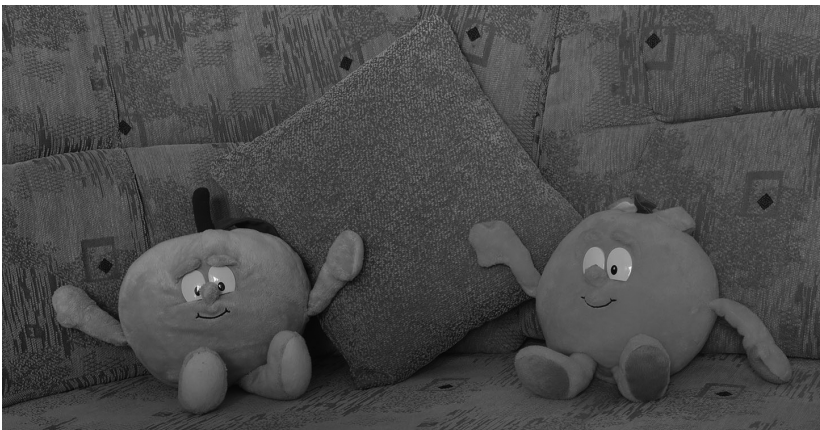


Vstupní barevný obrázek

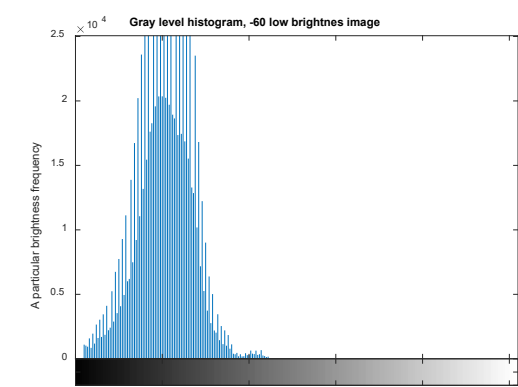
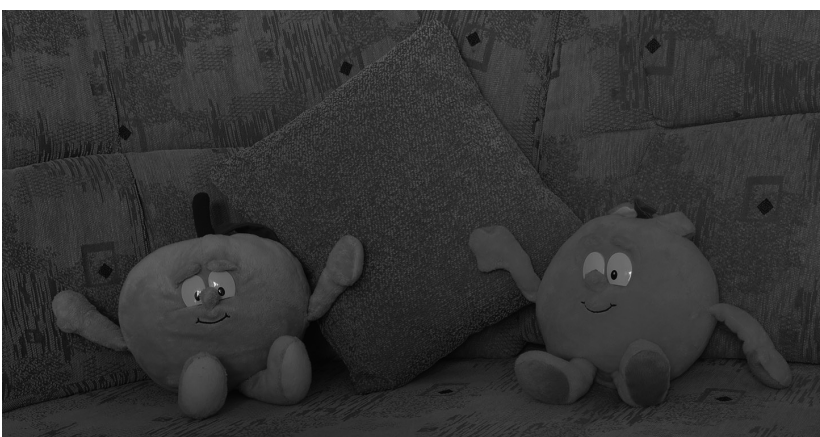
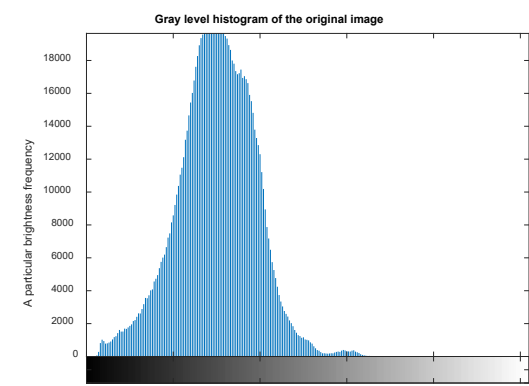
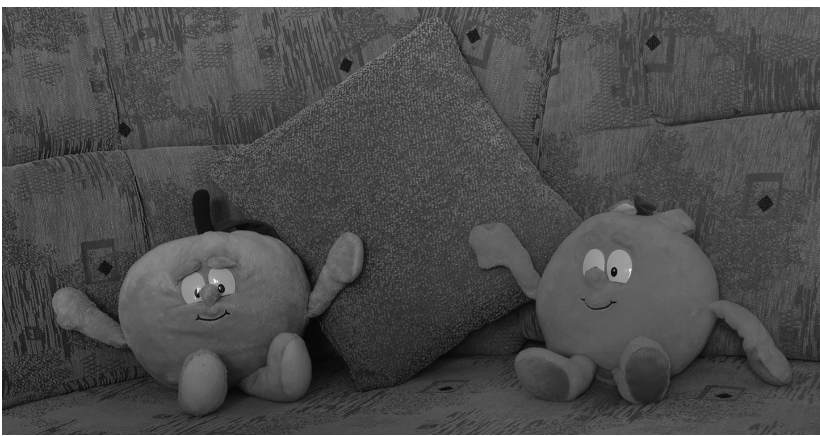


Po převodu na šedotónový obraz

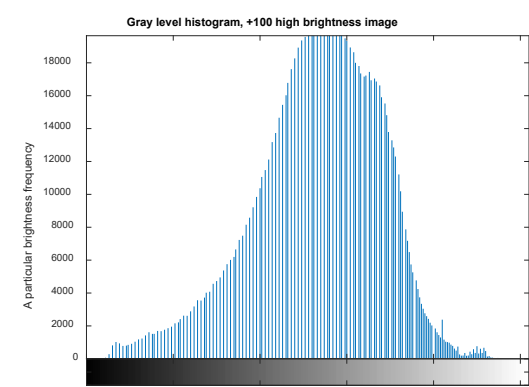
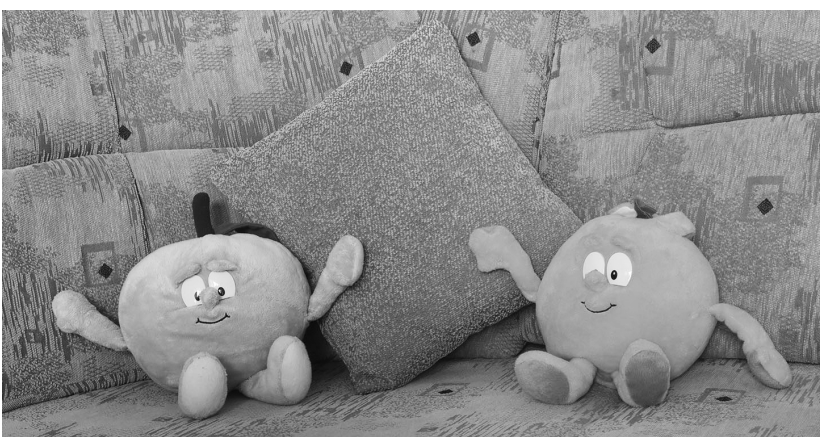
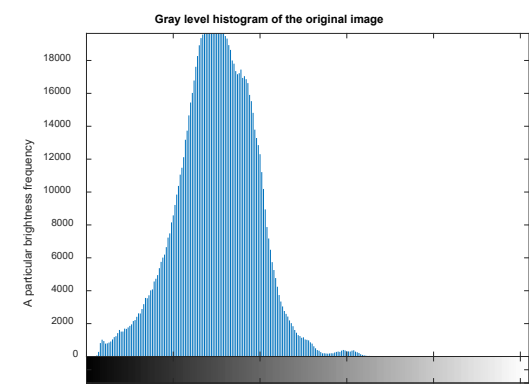
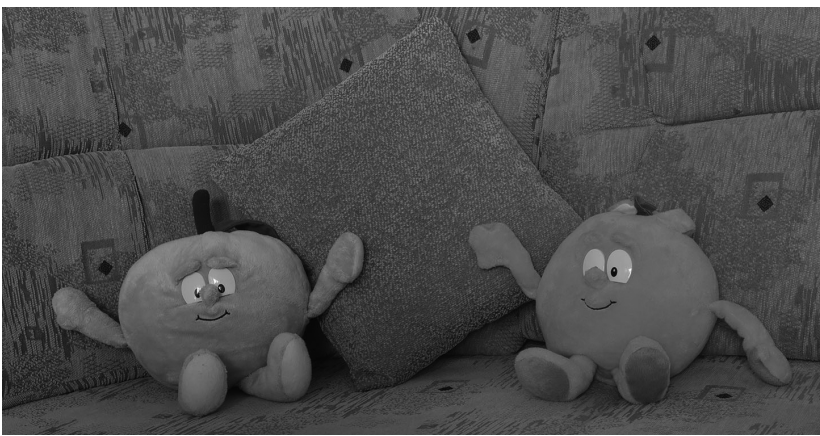
# Ilustrace optimálně zvýšeného kontrastu



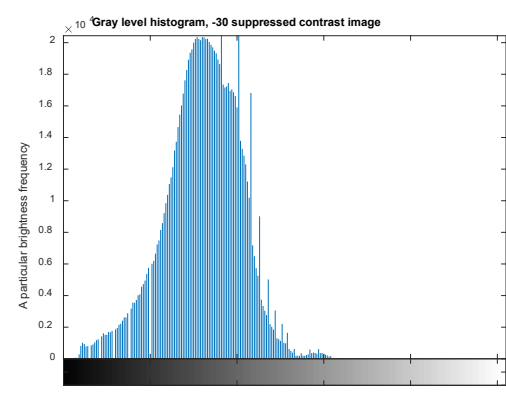
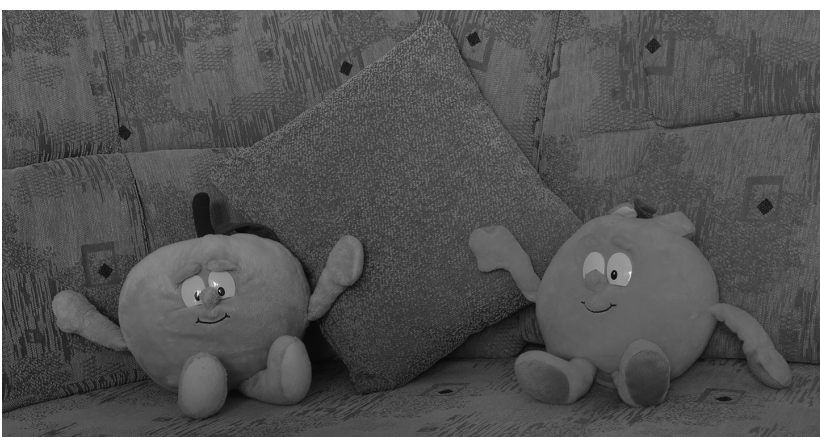
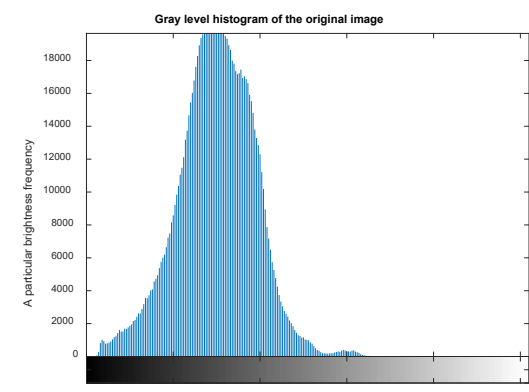
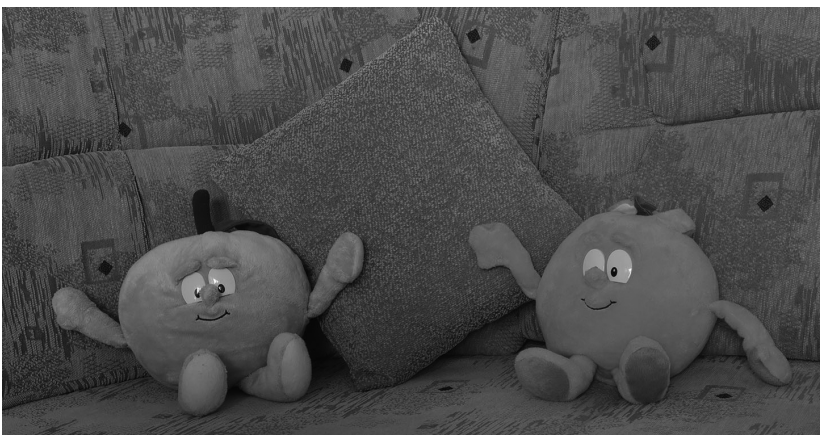
# Ilustrace sníženého jasu



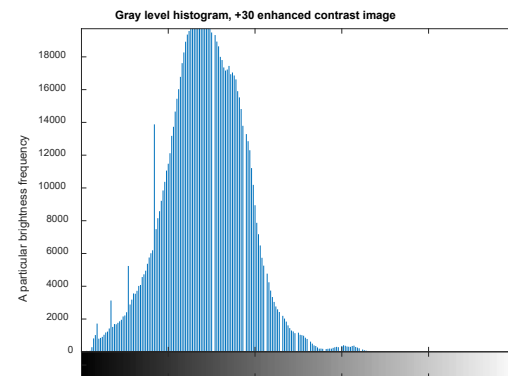
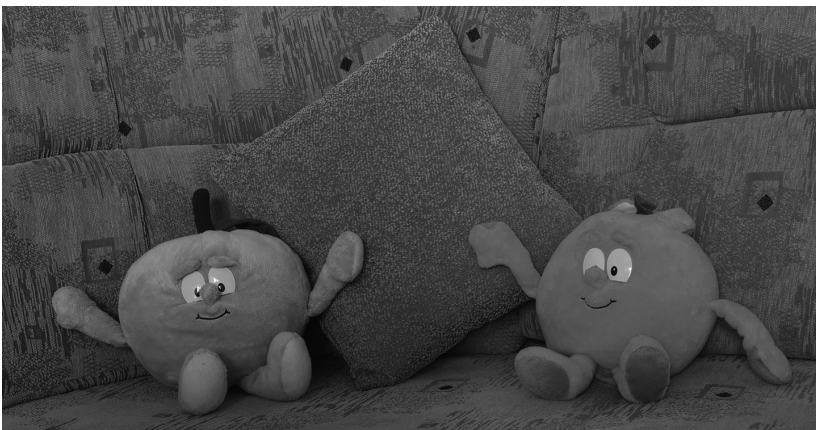
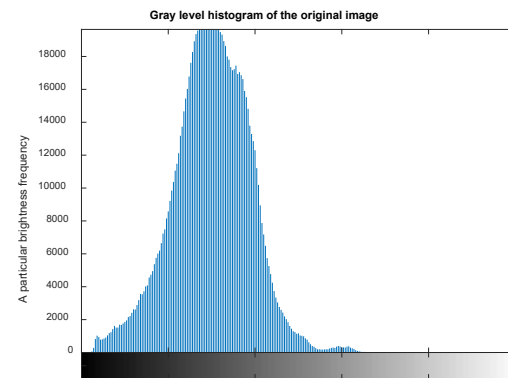
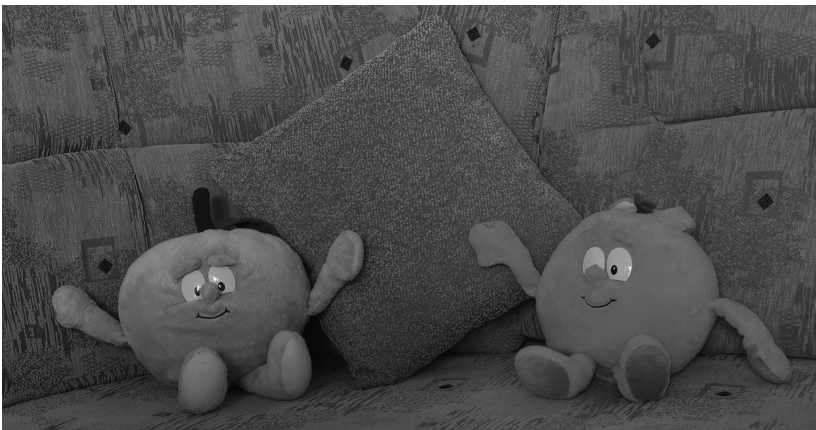
# Ilustrace zvýšeného jasu



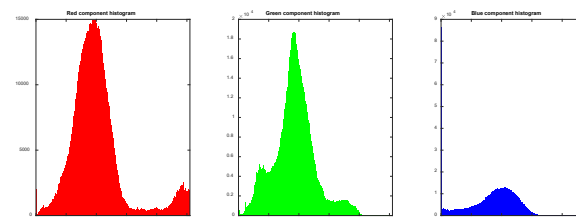
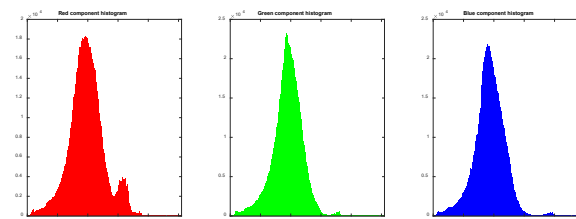
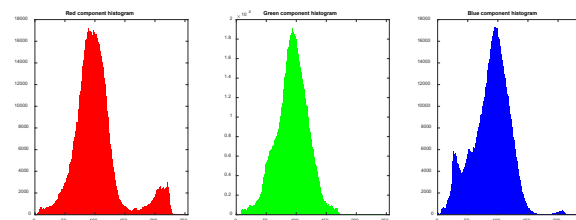
# Ilustrace sníženého kontrastu



# Ilustrace zvýšeného kontrastu



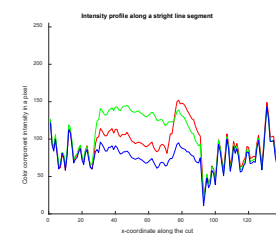
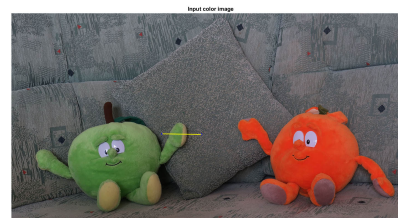
# Ilustrace barevné sytosti



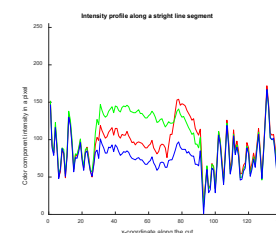
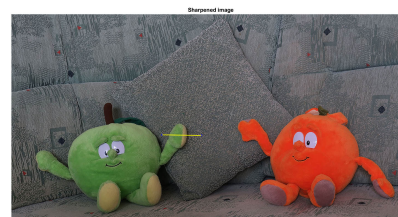


# Ilustrace ostrosti obrazu

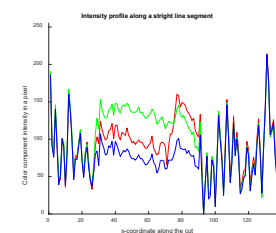
Výchozí obrázek



Mírné ostření



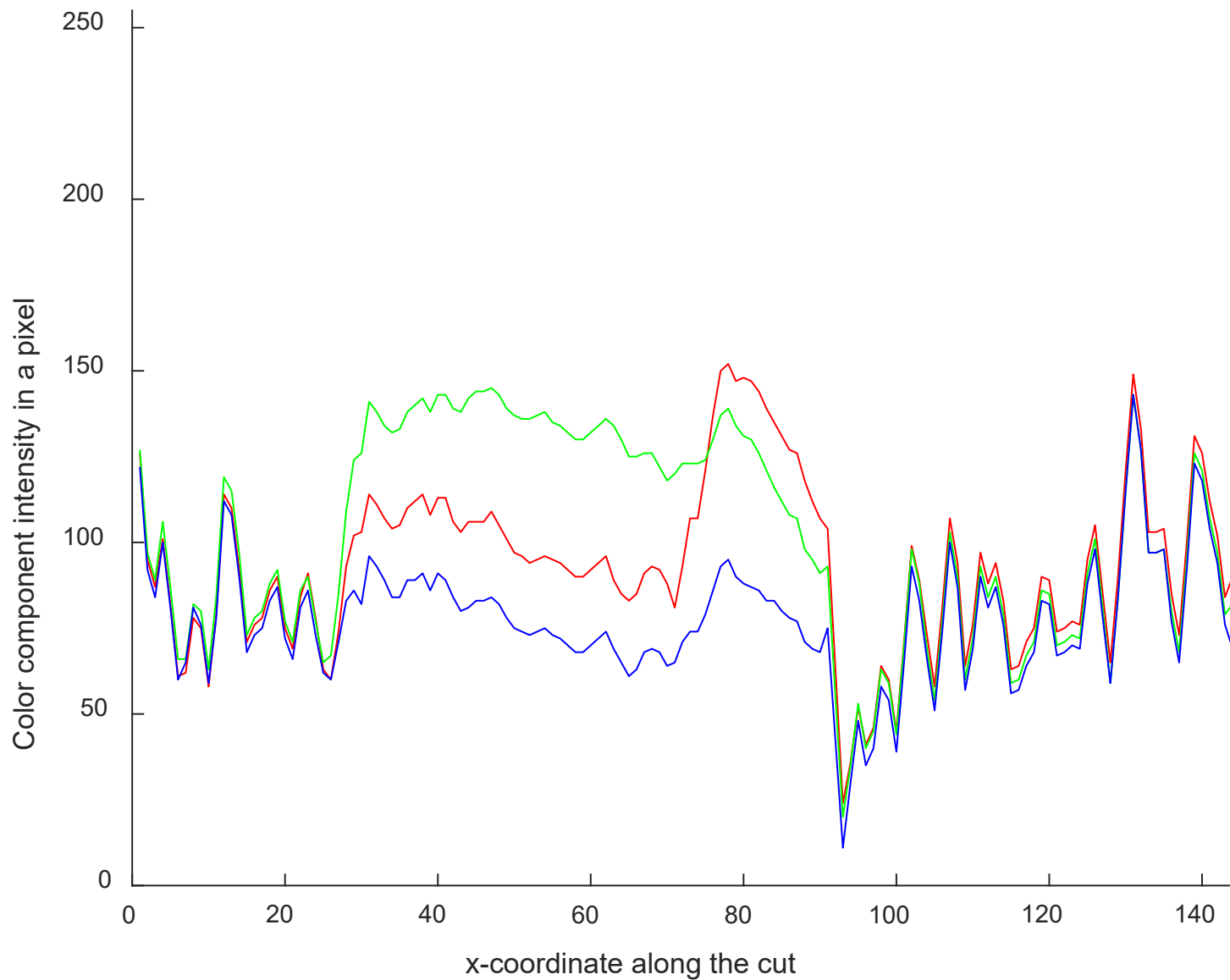
Silnější ostření



Input color image



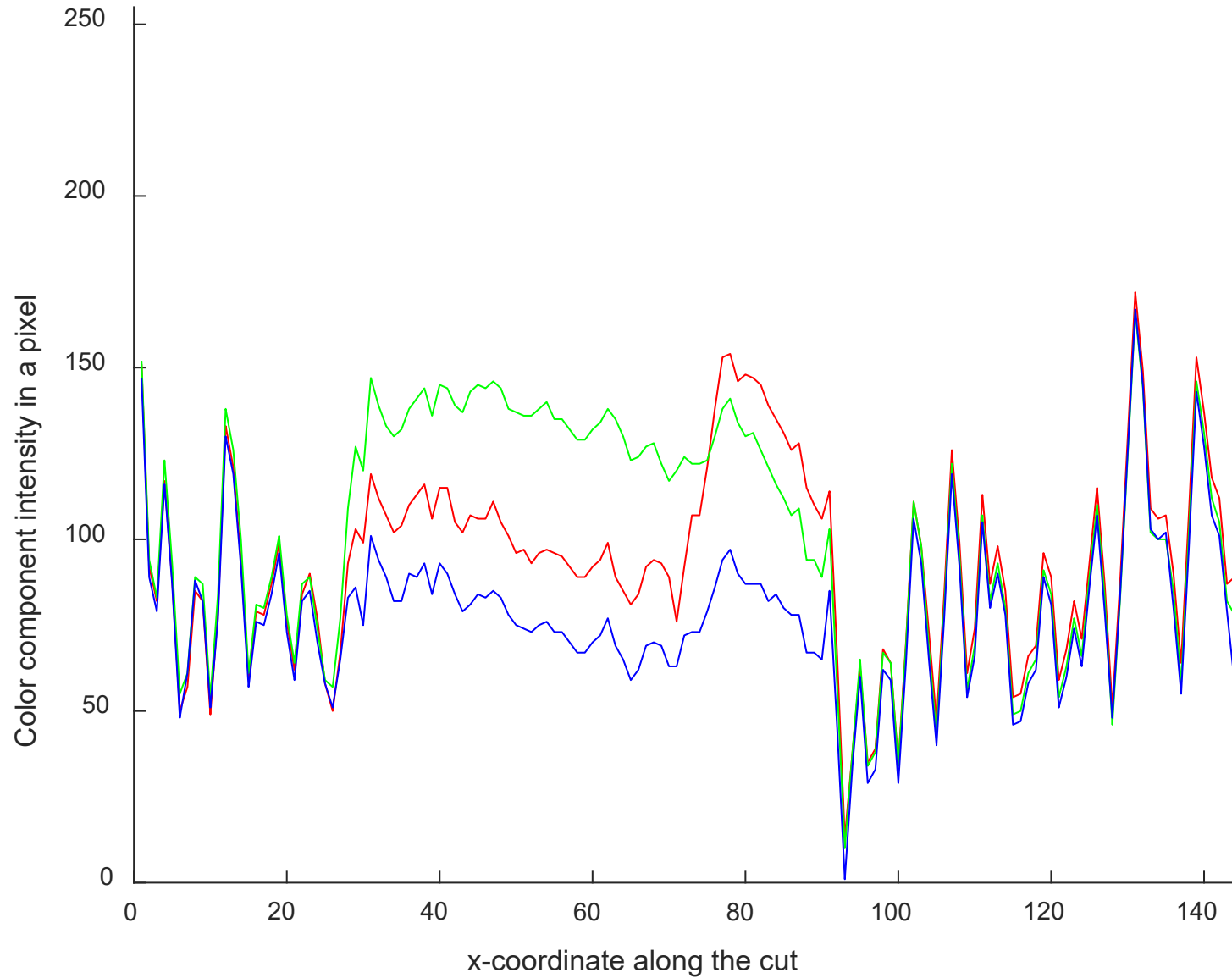
Intensity profile along a straight line segment



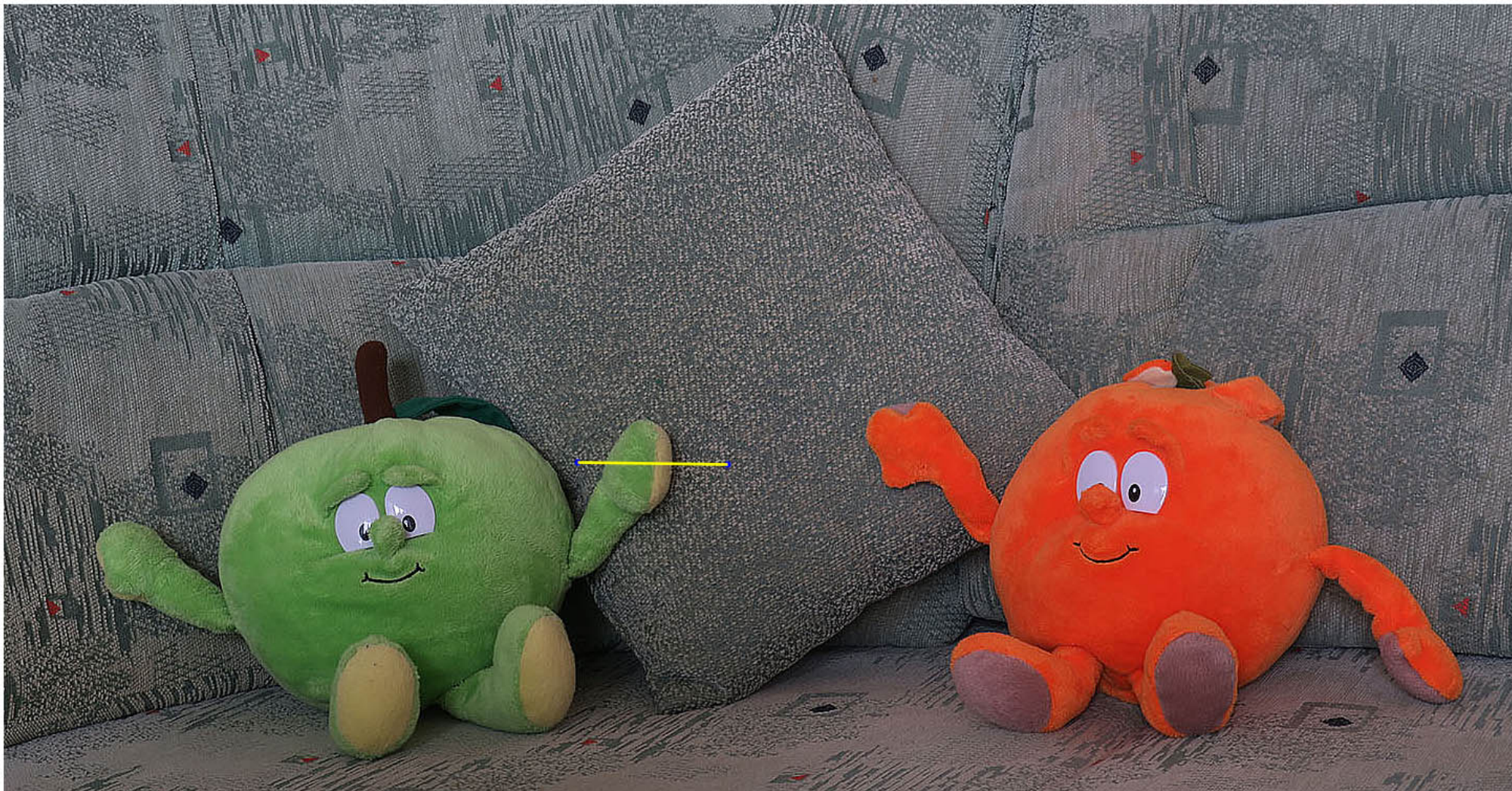
Sharpened image



Intensity profile along a straight line segment



More sharpened image



Intensity profile along a straight line segment

