

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

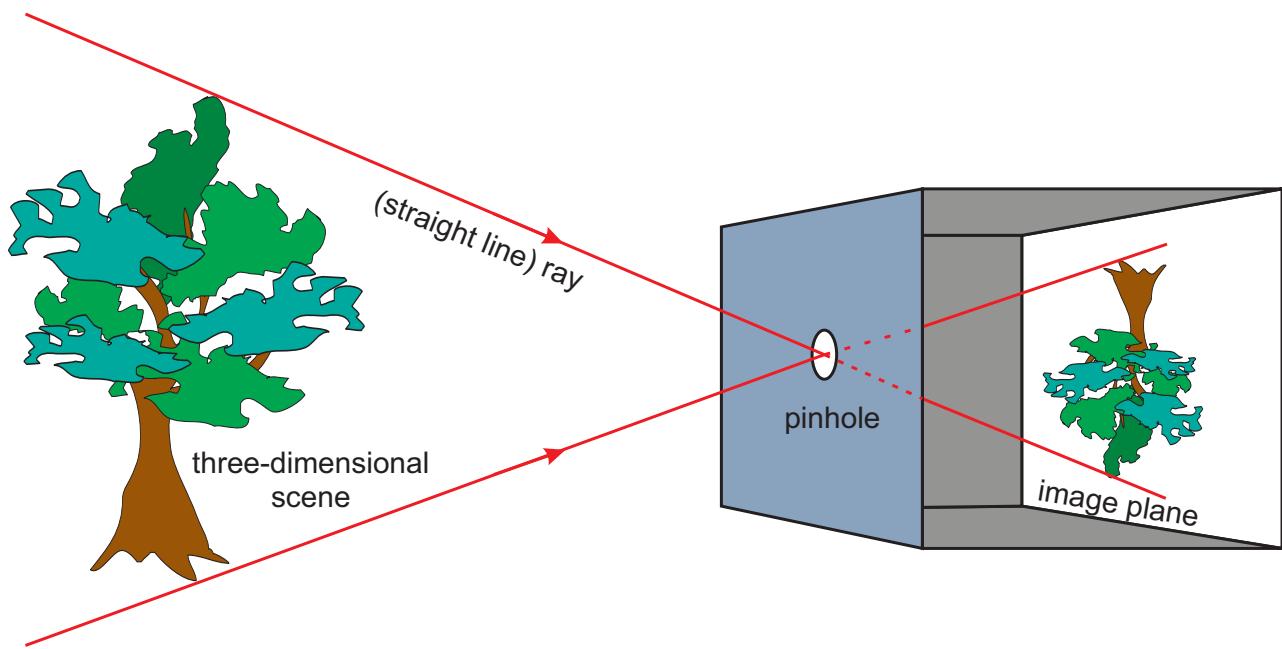
<http://people.ciirc.cvut.cz/hlavac>, vaclav.hlavac@cvut.cz

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

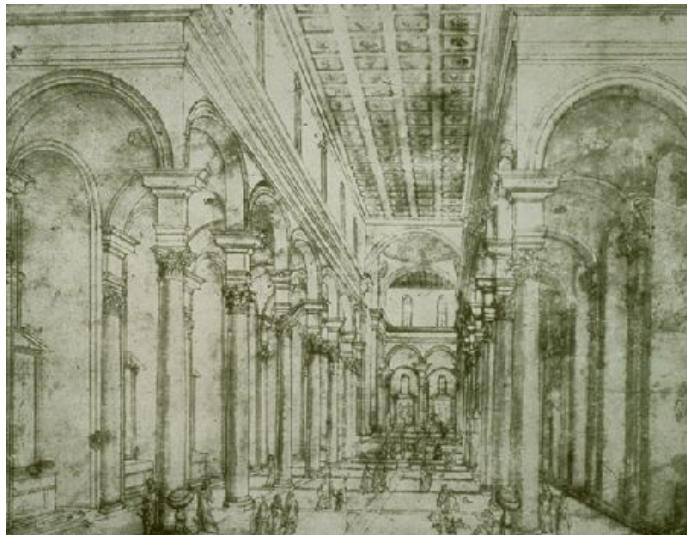
- ◆ **Obraz** je chápán intuitivně jako vjem na sítnici lidského oka, obraz na světlocitlivém čipu, TV kameře, ...
- ◆ Obraz je často pořízen pomocí **perspektivní projekce** shodující se s intuitivním modelem dírkové komory.



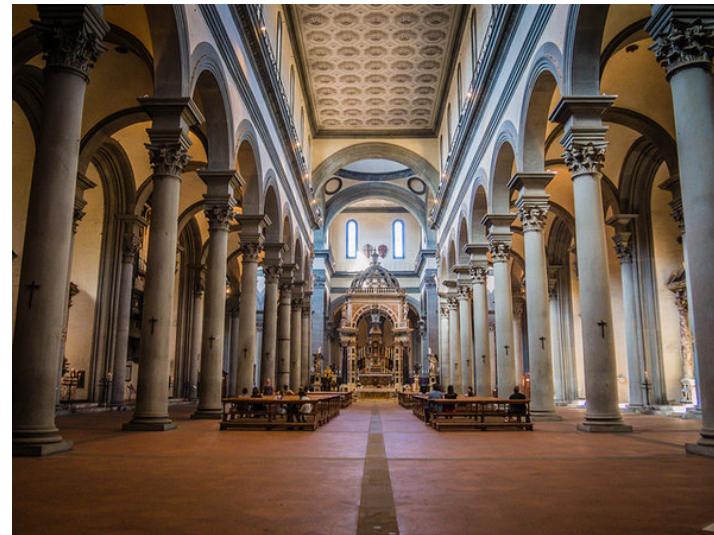
Konvence:
Uvažujeme směr světla
zleva doprava.

Perspektivní zobrazování započalo v italském renesančním malířství

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



Kresba z ≈1420



Pohled do kostela postaveného 1434-82

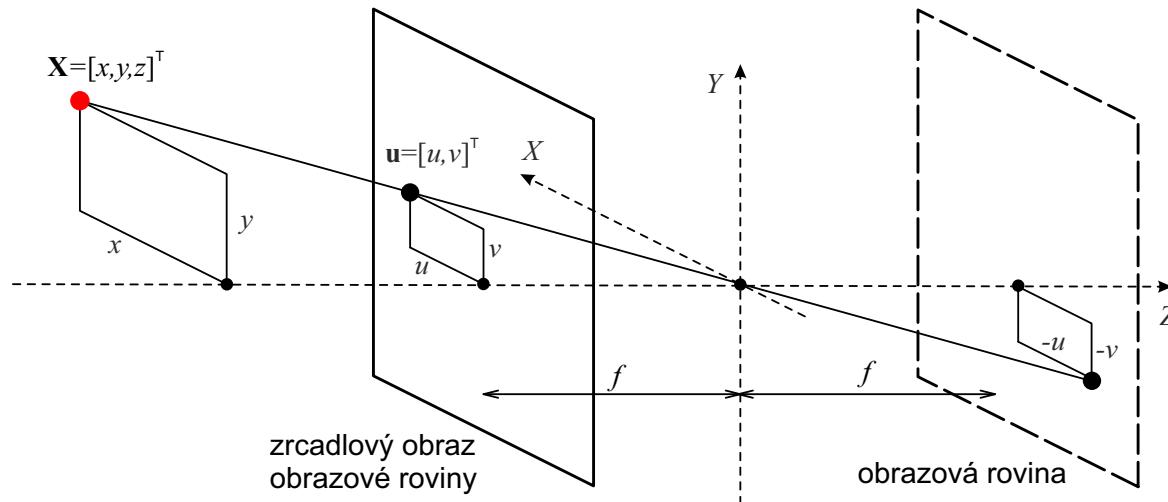
Ukázka praktické perspektivy ze 16. století



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

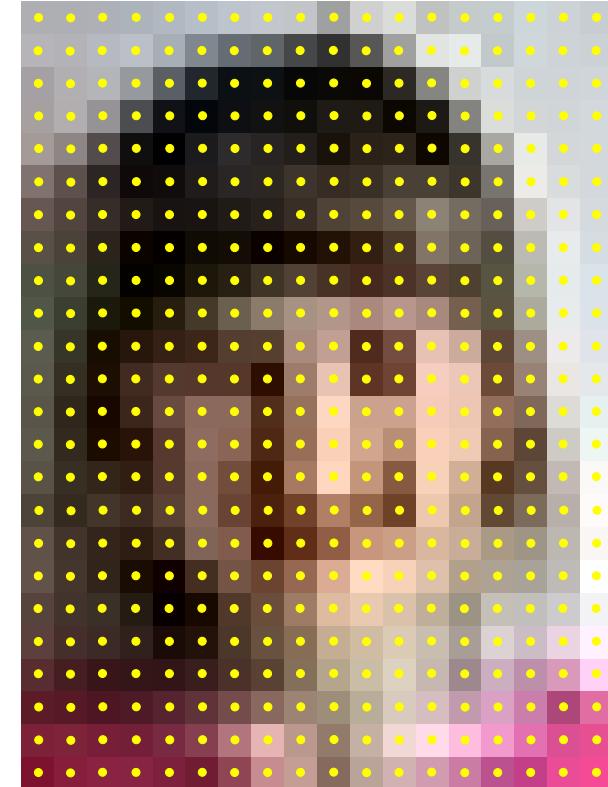
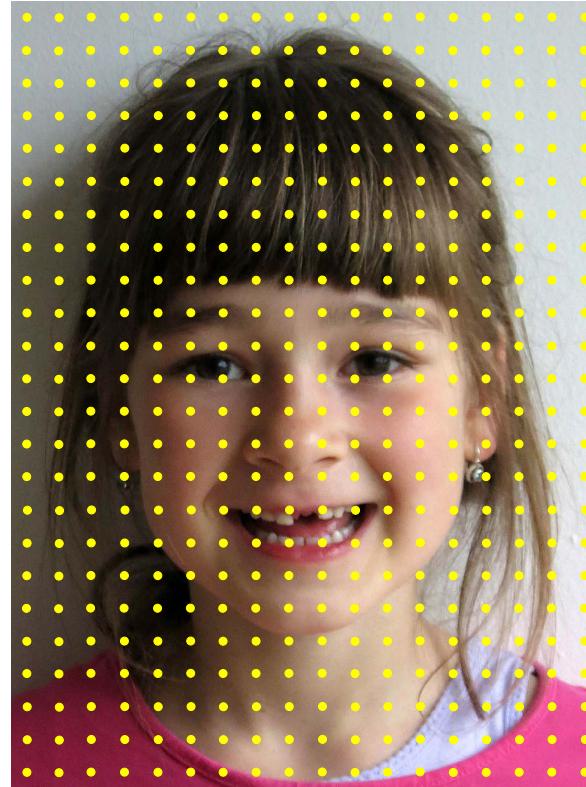


- ◆ Při uvažování podobných trojúhelníků: $u = \frac{xf}{z}$, $v = \frac{yf}{z}$. Místo odvozené 2D obrazové funkce $f(u, v)$ se obvykle používá značení $f(x, y)$.
- ◆ Hodnota obrazové funkce odpovídá barvě/jasu 3D bodu (znázorněnému v obrázku červenou tečkou) v příslušném místě ve scéně, který je perspektivně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

Spojity 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 matici 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 spojité 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 příhrádek). U šedotónového obrazu např. na 256 hodnot.



Příklad:

šedý klín



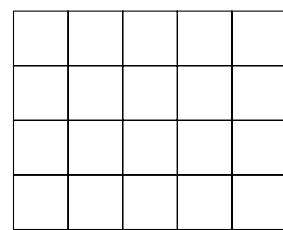
6 šedotónových příhrádek

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

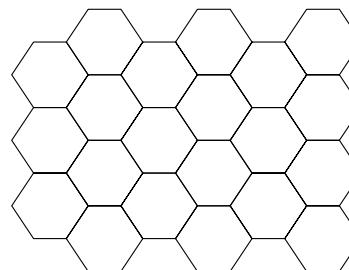
Vzorkování obrazu

Vzorkování obrazu zahrnuje dvě úlohy:

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



(a)

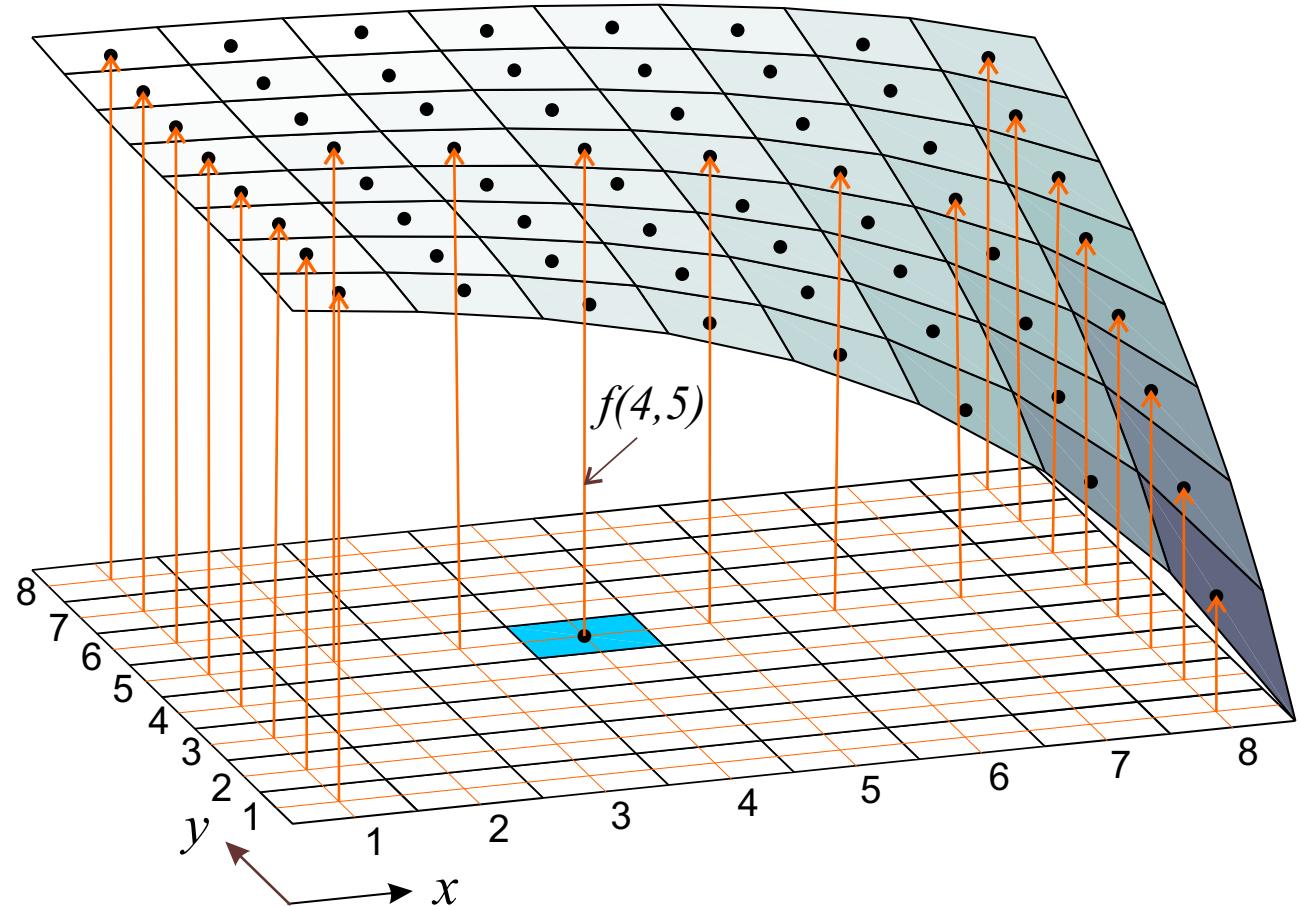
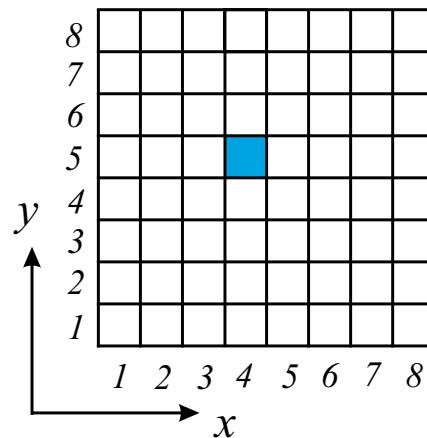


(b)

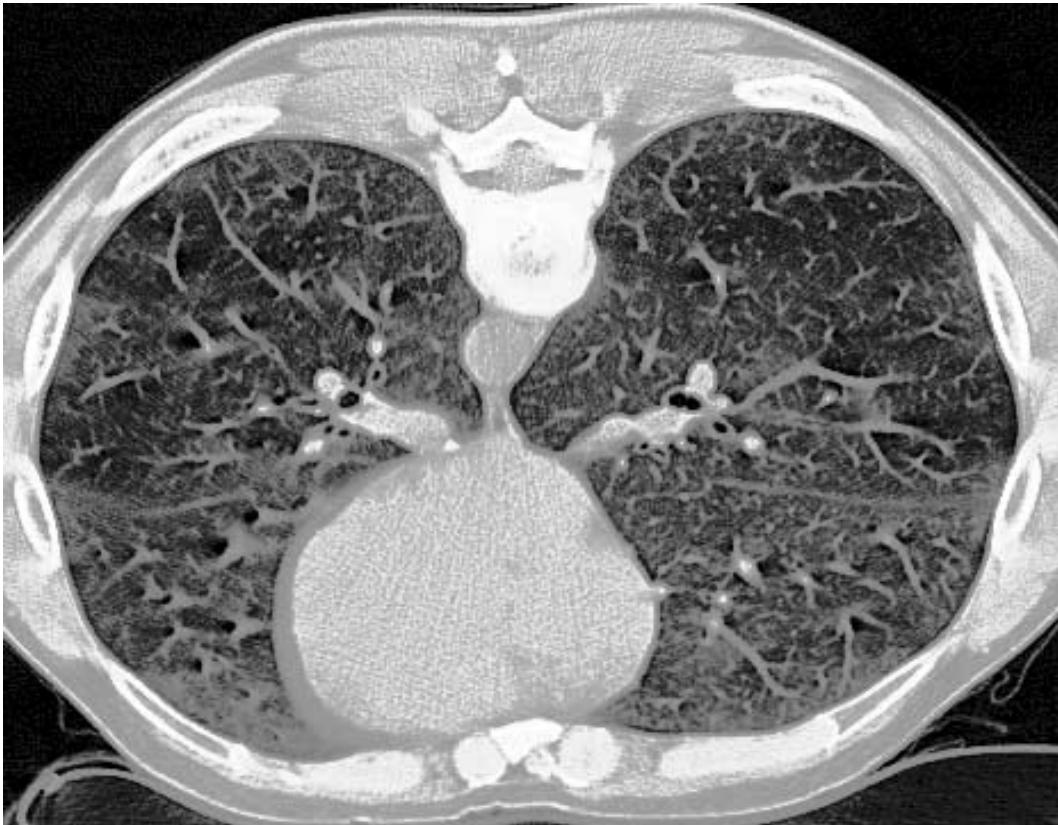
2. **Rychlosť/vzdáenosť vzorkovania** (vyjadruje Nyquist-Shannonova věta o vzorkování).

- ◆ **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 obrazkem 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 256×256



128×128

Vzorkování, příklad 2



Originál 256×256

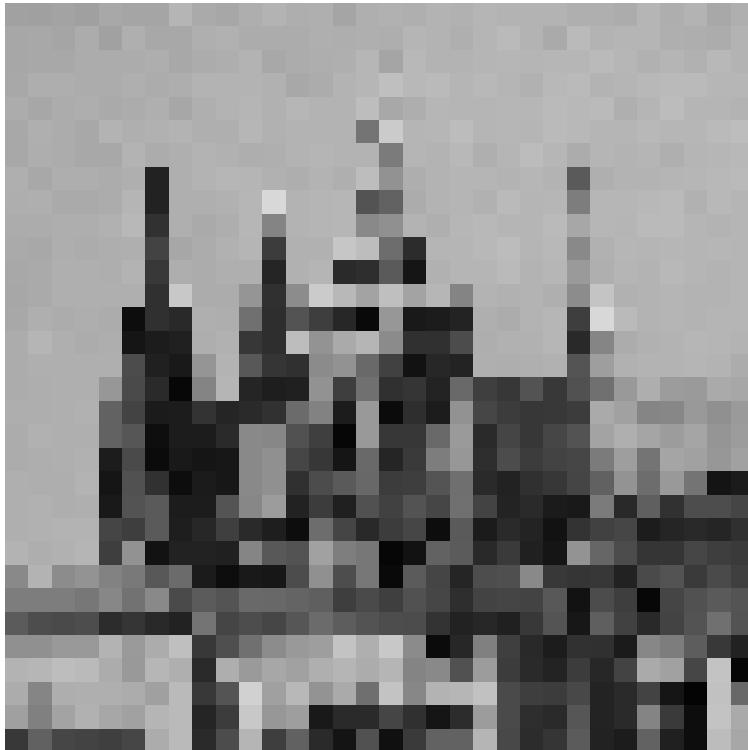


64×64

Vzorkování, příklad 3



Originál 256×256



32×32

Kvantování, příklad 1



Originál 256 jasových úrovní



64 jasových úrovní

Kvantování, příklad 2



Originál 256 jasových úrovní



16 jasových úrovní

Kvantování, příklad 3



Originál 256 jasových úrovní



4 jasové úrovně

Kvantování, příklad 4 (binární obraz)



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

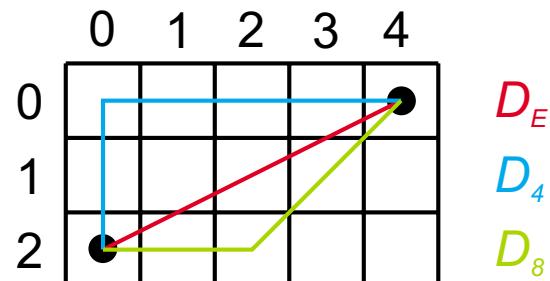
$$D_E((x, y), (h, k)) = \sqrt{(x - h)^2 + (y - k)^2}.$$

Vzdálenost městských bloků (též vzdálenost na Manhattanu)

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

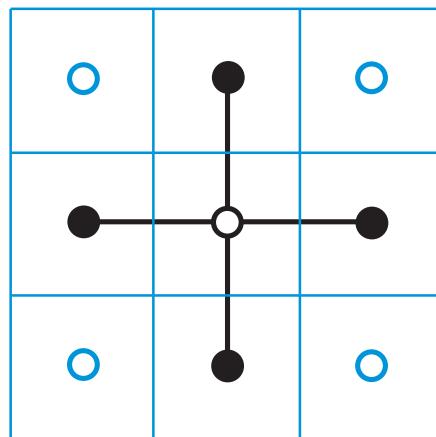
Vzdálenost na šachovnici (z pohledu šachového krále)

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

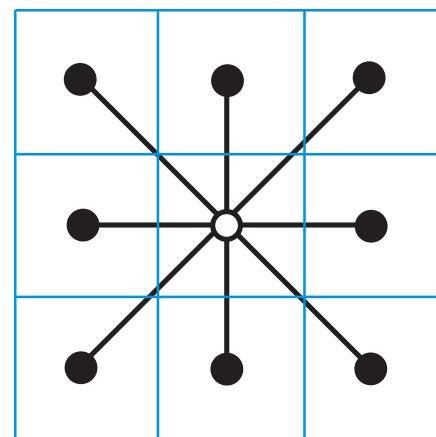


Čtyř, osmi a šesti okolí

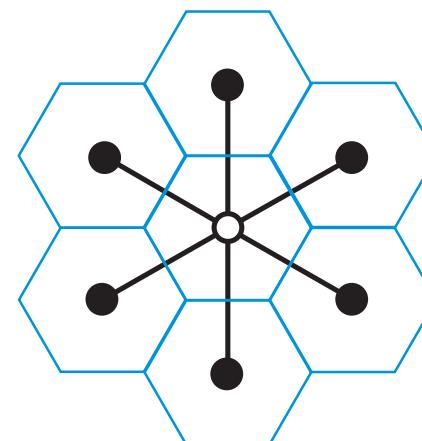
Množina složená ze samotného pixelu (uprostřed, nazývaný reprezentativní pixel nebo reprezentativní bod) a jeho sousedé ve vzdálenosti 1.



4-okolí

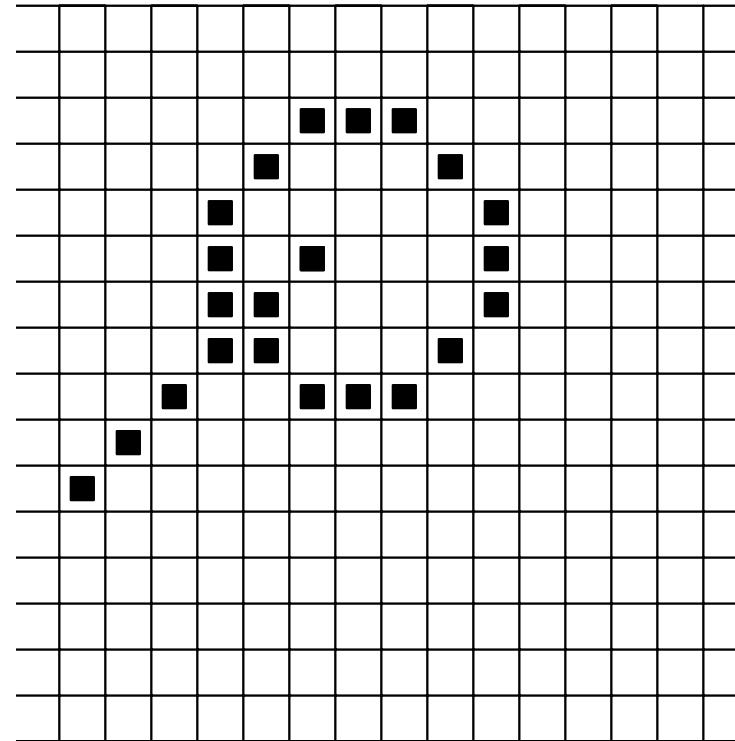
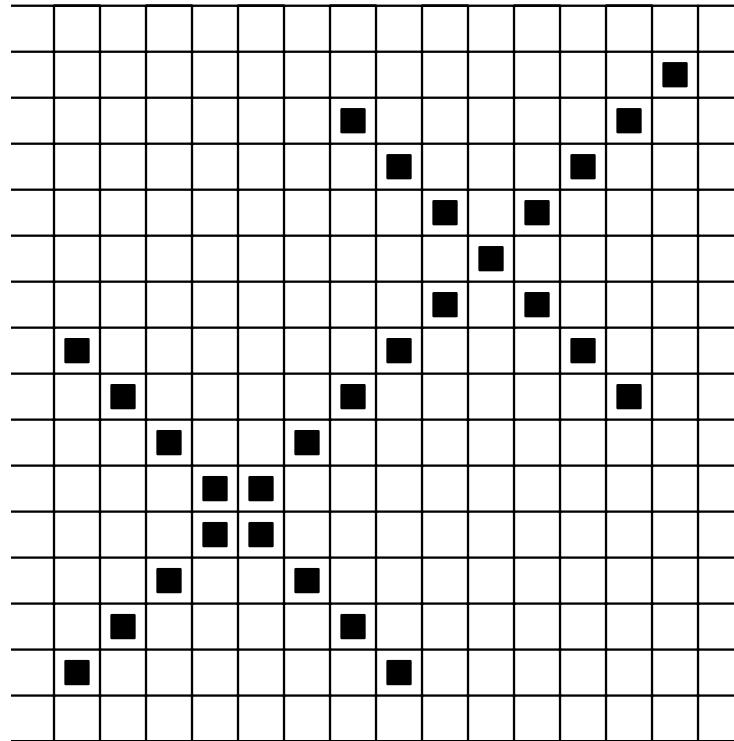


8-okolí



6-okolí

Paradox protínajících se úseček



Binární obraz & relace “být souvislým”

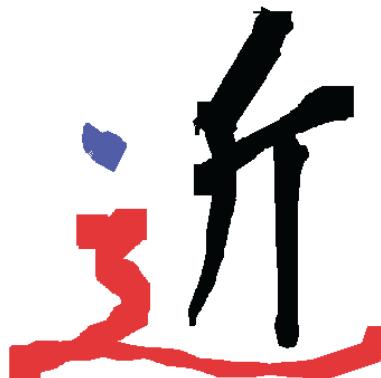


černá ~ objekty
bílá ~ pozadí

- ◆ 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.

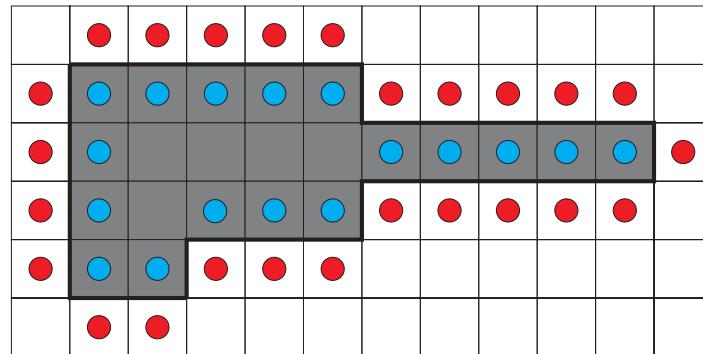
Oblast = souvislá množina

- ◆ Relace ' x je souvislé s y ' je
 - reflexivní, $x \sim x$,
 - symetrická $x \sim y \implies y \sim x$ and
 - transitivní $(x \sim y) \& (y \sim z)$
 $\implies x \sim z$. Tedy 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

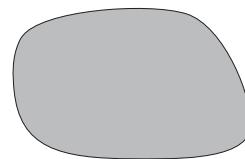
- ◆ Hranice oblasti je množina pixelů oblasti majících alespoň jednoho souseda nepatřícího do oblasti.
- ◆ Spojitá obrazové funkce \Rightarrow nekonečně tenká hranice.
- ◆ V digitálním obraze má hranice konečnou tloušťku. Je nutné rozlišovat vnitřní a vnější hranici.



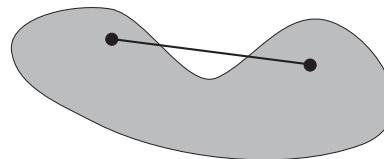
- ◆ Pozor na terminologii:
Hranice oblasti (border) \times hrana (edge), tj. gradient obrazové funkce \times hranový bod (edgel),
tj. místo s významnou velikostí gradientu.

Konvexní množina, konvexní obal

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



konvexní

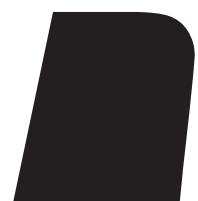


nekonvexní

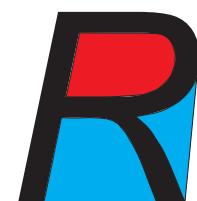
Konvexní obal, jezero, záliv.



Region



Convex
hull



Lakes
Bays

Vlastnosti obrazu používané při jeho hodnocení/vylepšování

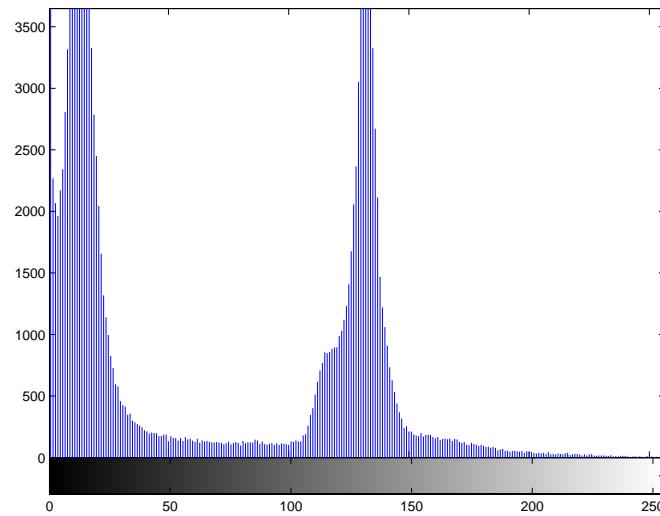
- ◆ Pro zpracování nebo vylepšování obrazu, ať člověkem nebo strojem, je potřebné obraz posoudit na základě jeho vlastností.
- ◆ Když se na obraz dívá člověk, je jeho vnímání obrazu závisí na složitém zpracování/interpretaci obrazu v mozku navíc ovlivněném **iluzemi**.
- ◆ Těmto složitostem se často pragmaticky vyhýbáme. Vhodnost obrazu pro pozorování člověkem si obvykle podstatně zjednodušíme 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 hrudi 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 (přirozeně 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 jasem/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) ↔ (krajina) neboli (hodnota jasu) ↔ (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 jasu, kontrastu, barevné sytosti nebo ostrosti obrazu.
- ◆ Příčinou může být, že **osvětlení scény** nebylo vhodné, nedostačoval **dynamický rozsah snímače**, 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

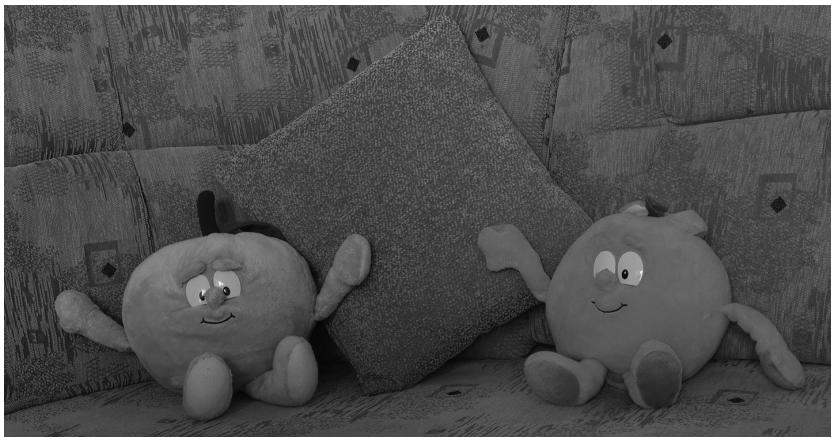
Výchozí barevný snímek tří objektů na pozadí zelené pohovky jsem vyfotografoval záměrně tak, aby ukazoval barevně málo odlišený objekt (čtvercový polštář) od pozadí a obsahoval dva barevně odlišné objekty, plyšové figurky, jednu figurku jinak zelenou a druhou oranžovou.



Začneme šedotónovými obrázky, konverze

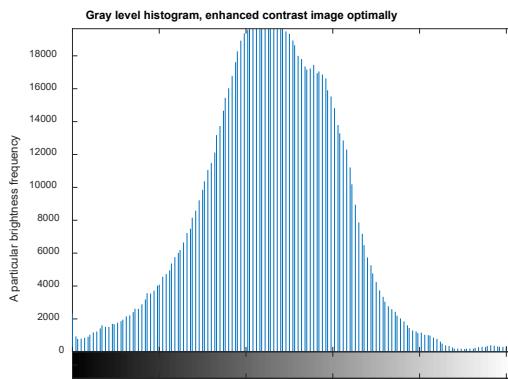
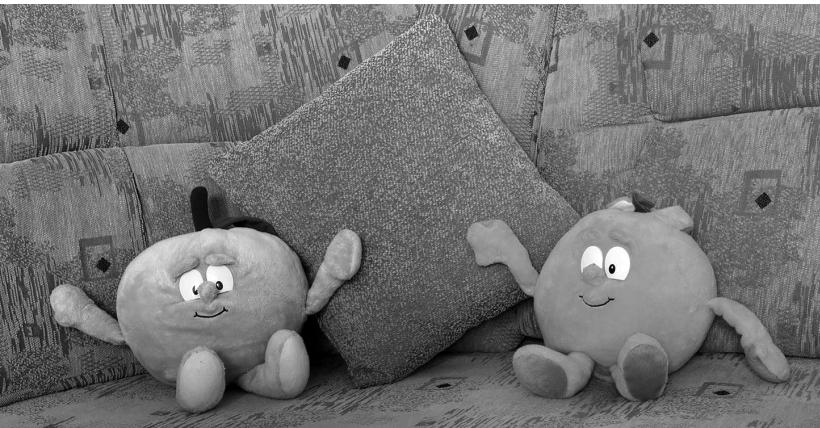
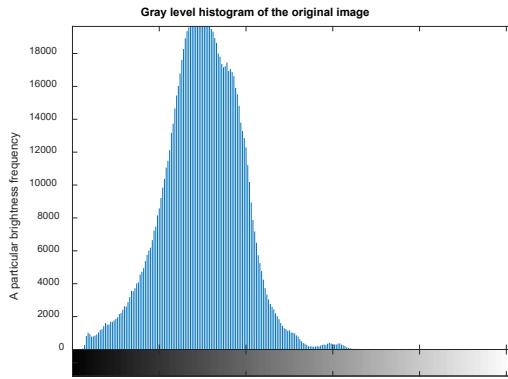
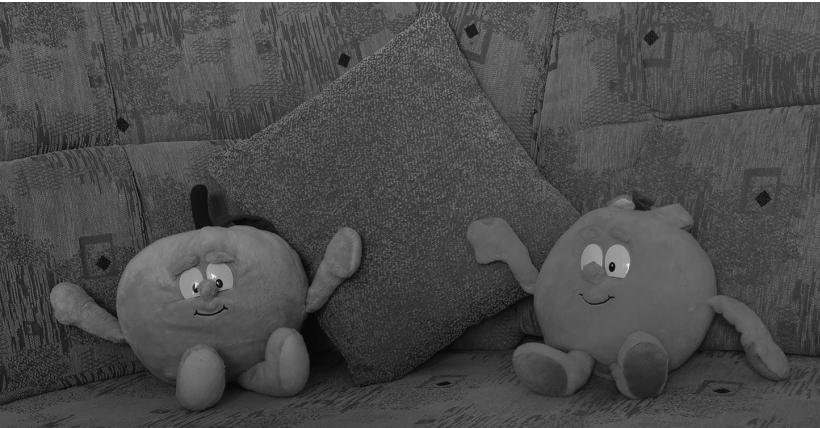


Vstupní barevný obrázek

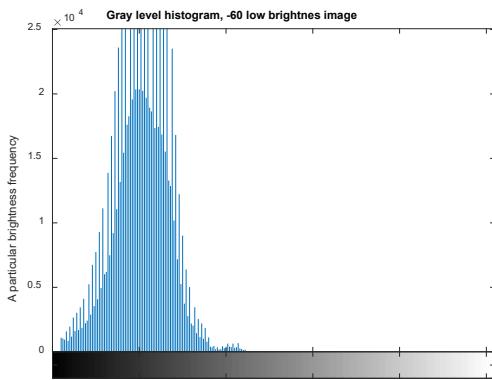
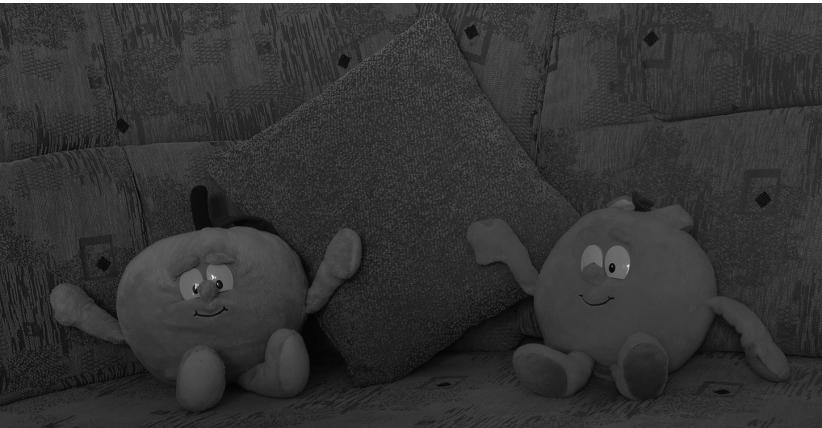
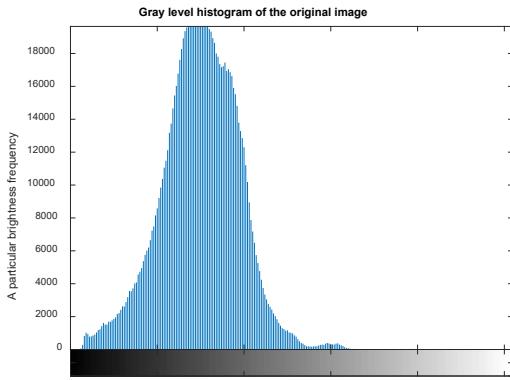
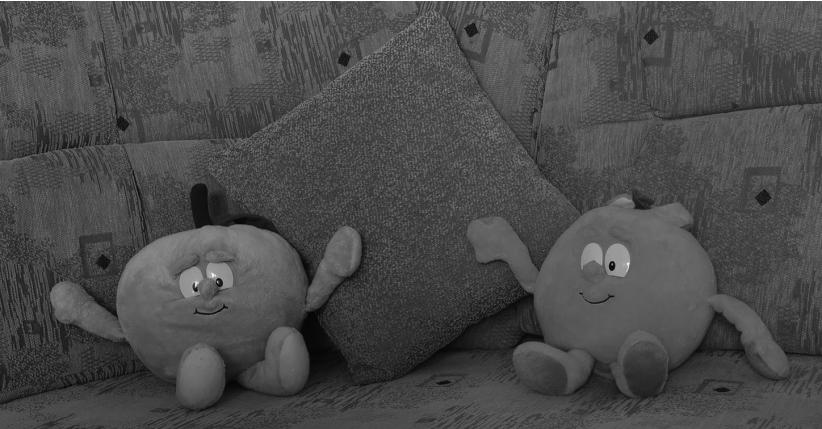


Po převodu na šedotónový obraz

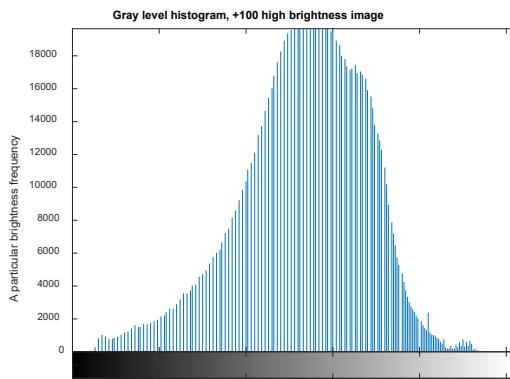
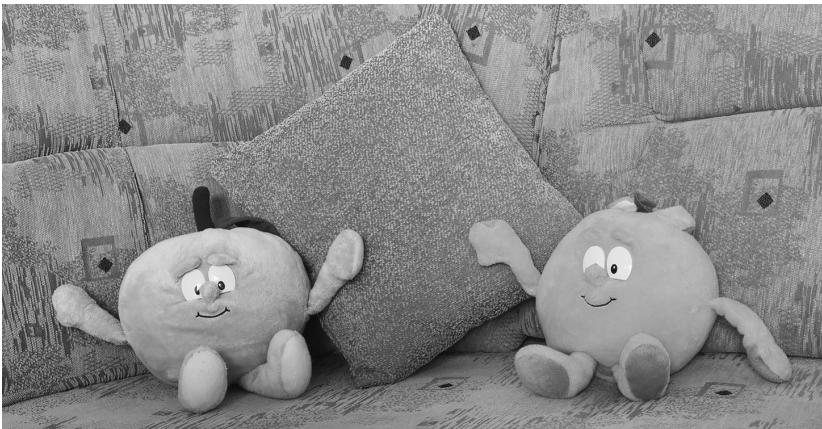
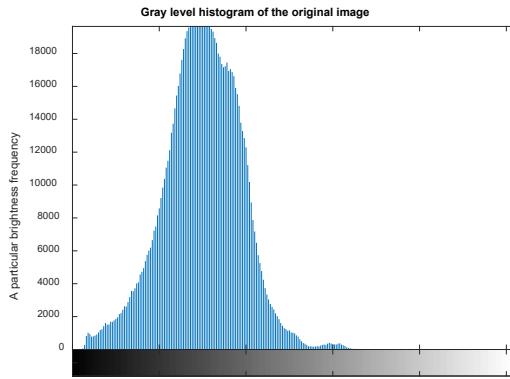
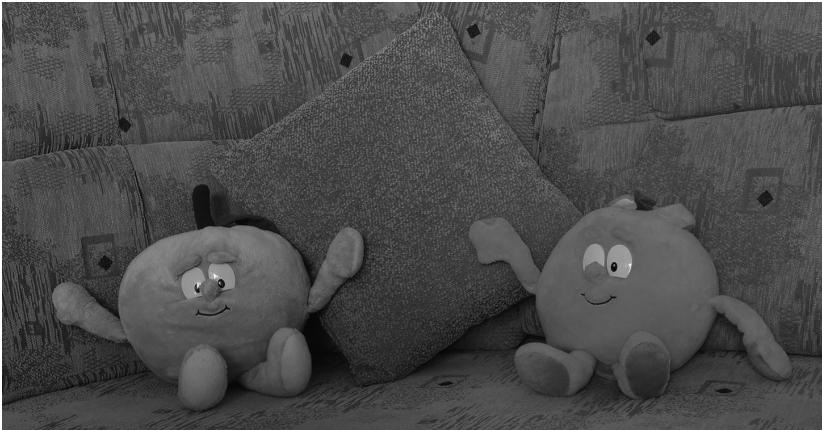
Ilustrace optimálně zvýšeného kontrastu



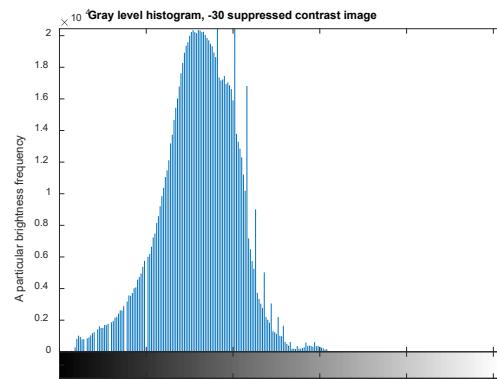
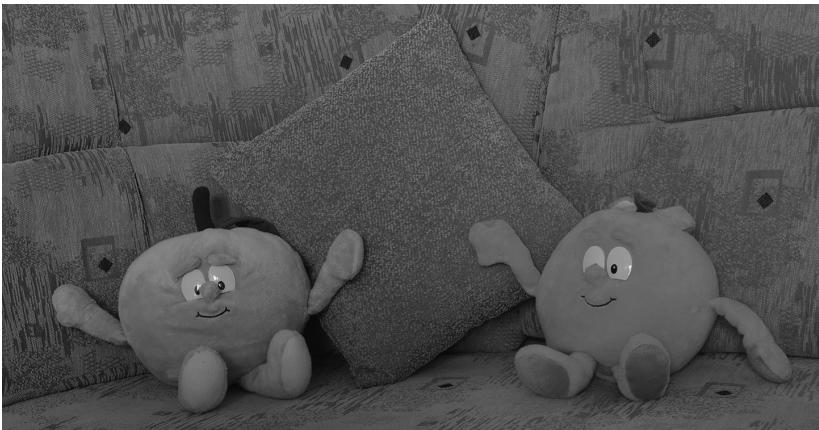
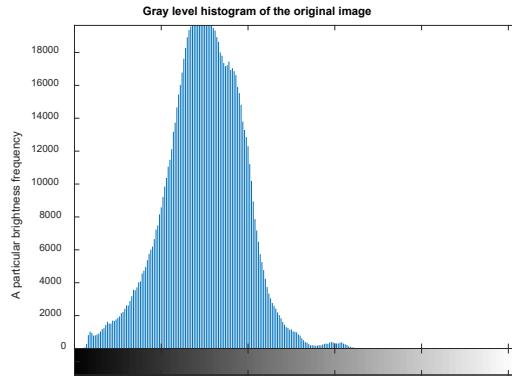
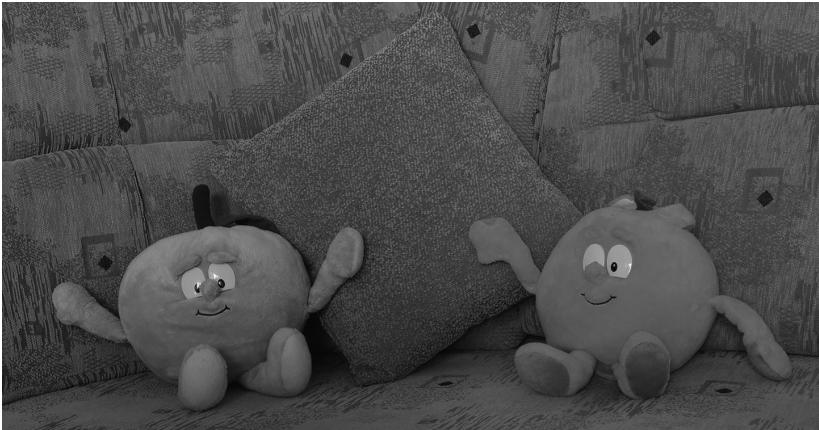
Illustrace sníženého jasu



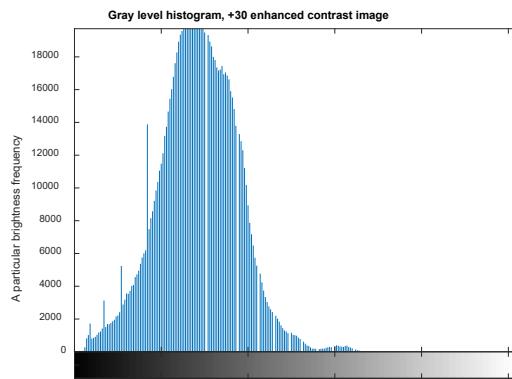
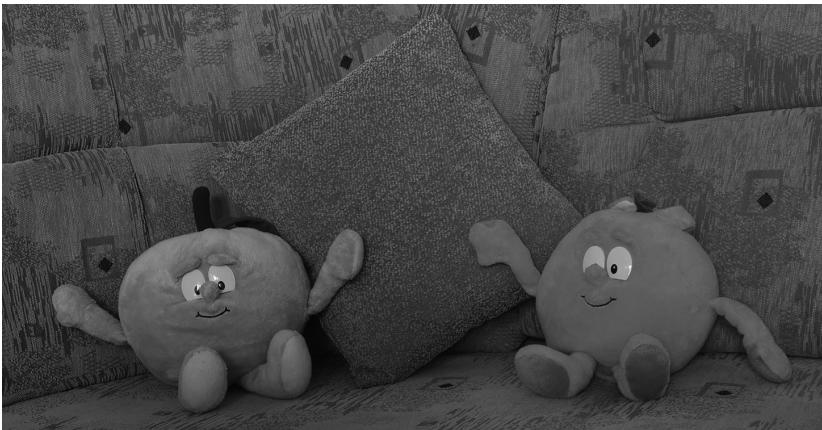
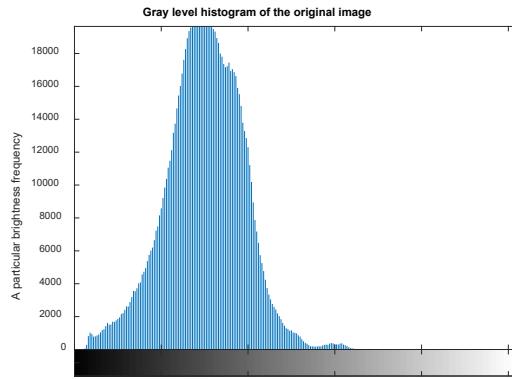
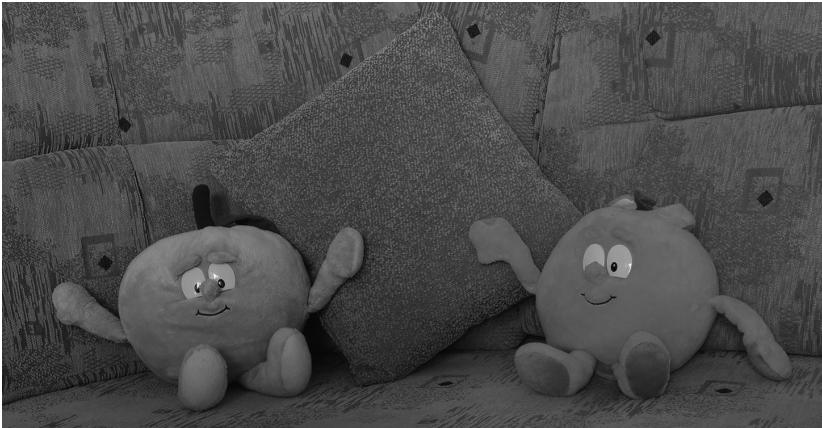
Ilustrace zvýšeného jasu



Illustrace sníženého kontrastu

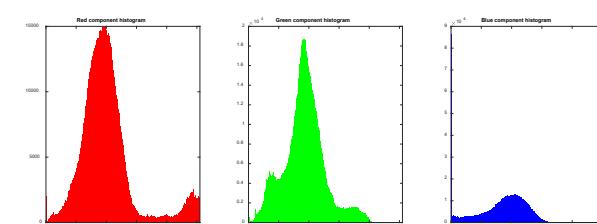
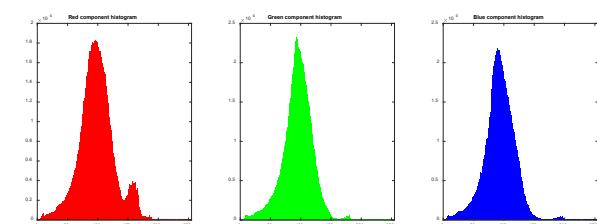
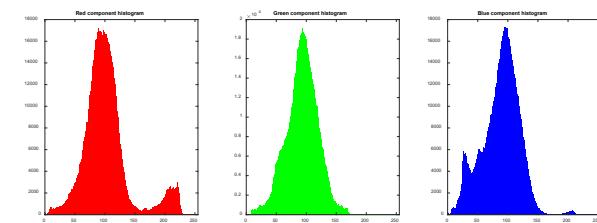


Illustrace zvýšeného kontrastu



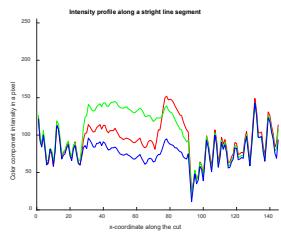


Illustrace barevné sytosti

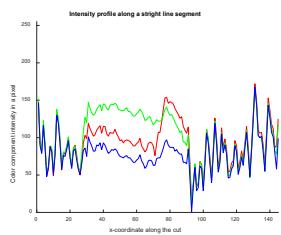


Ilustrace ostrosti obrazu

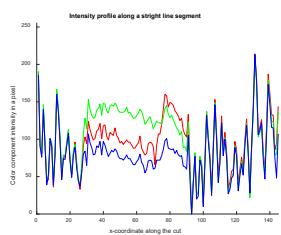
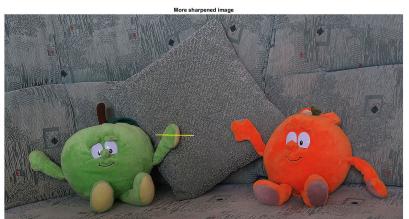
Výchozí obrázek



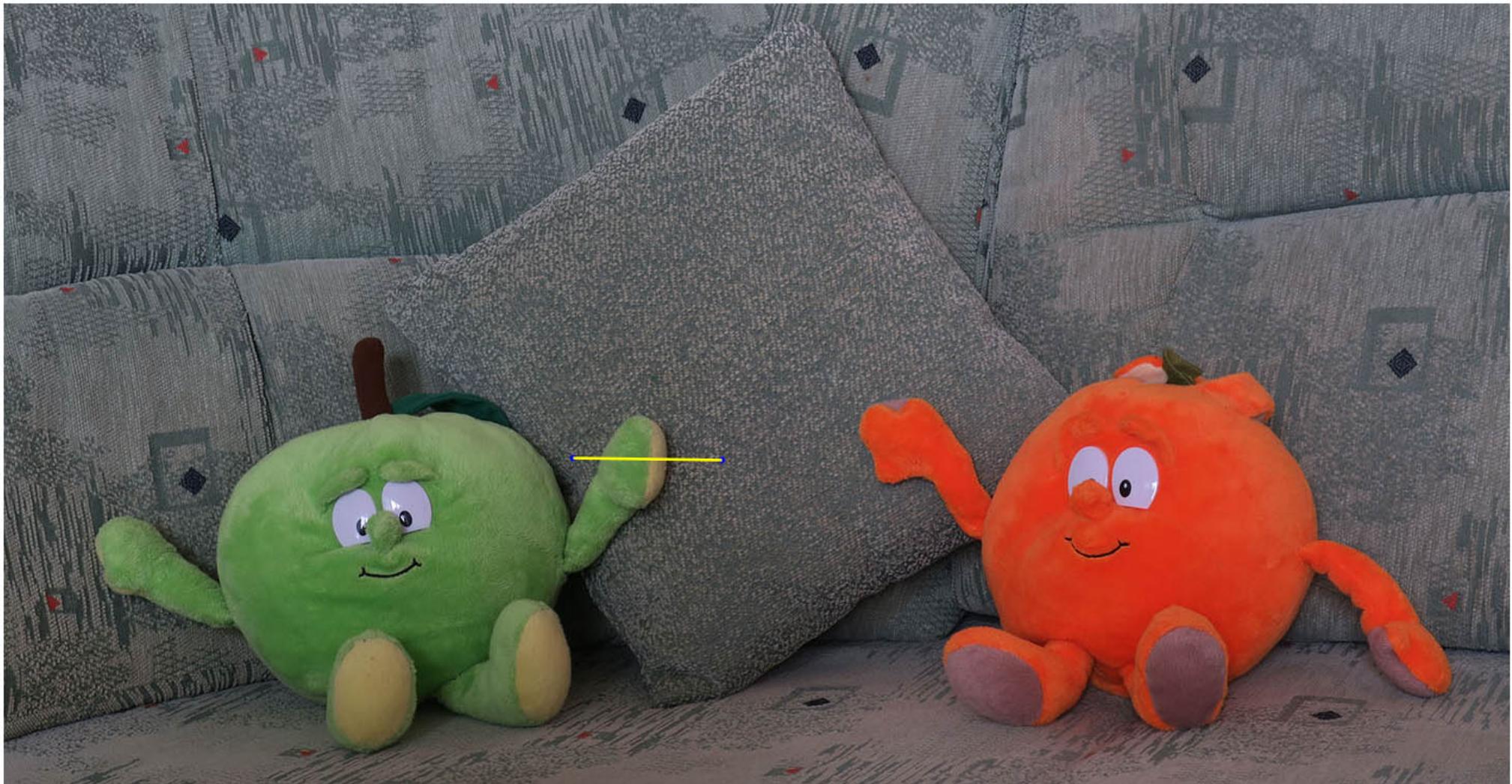
Mírné ostření



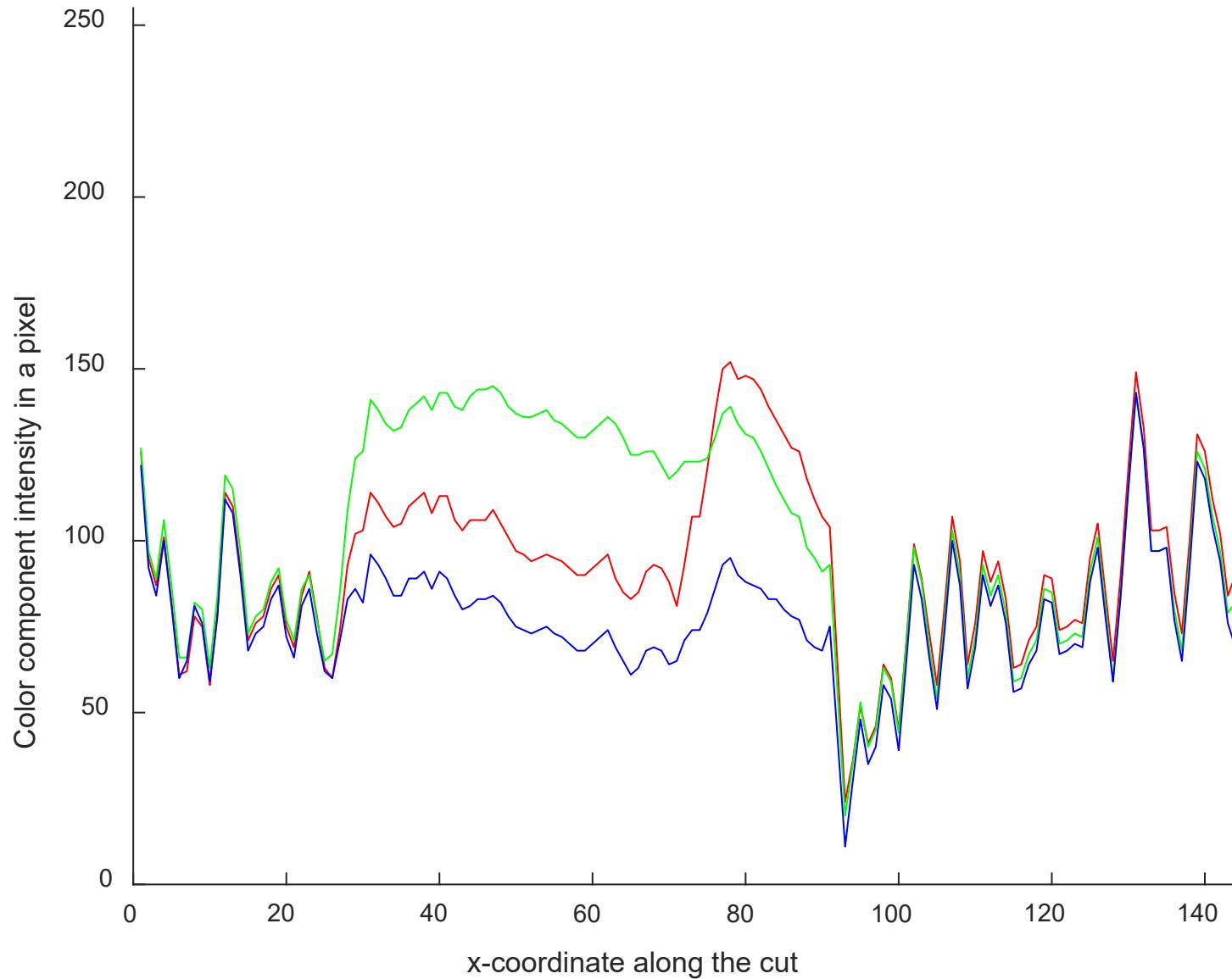
Silnější ostření



Input color image



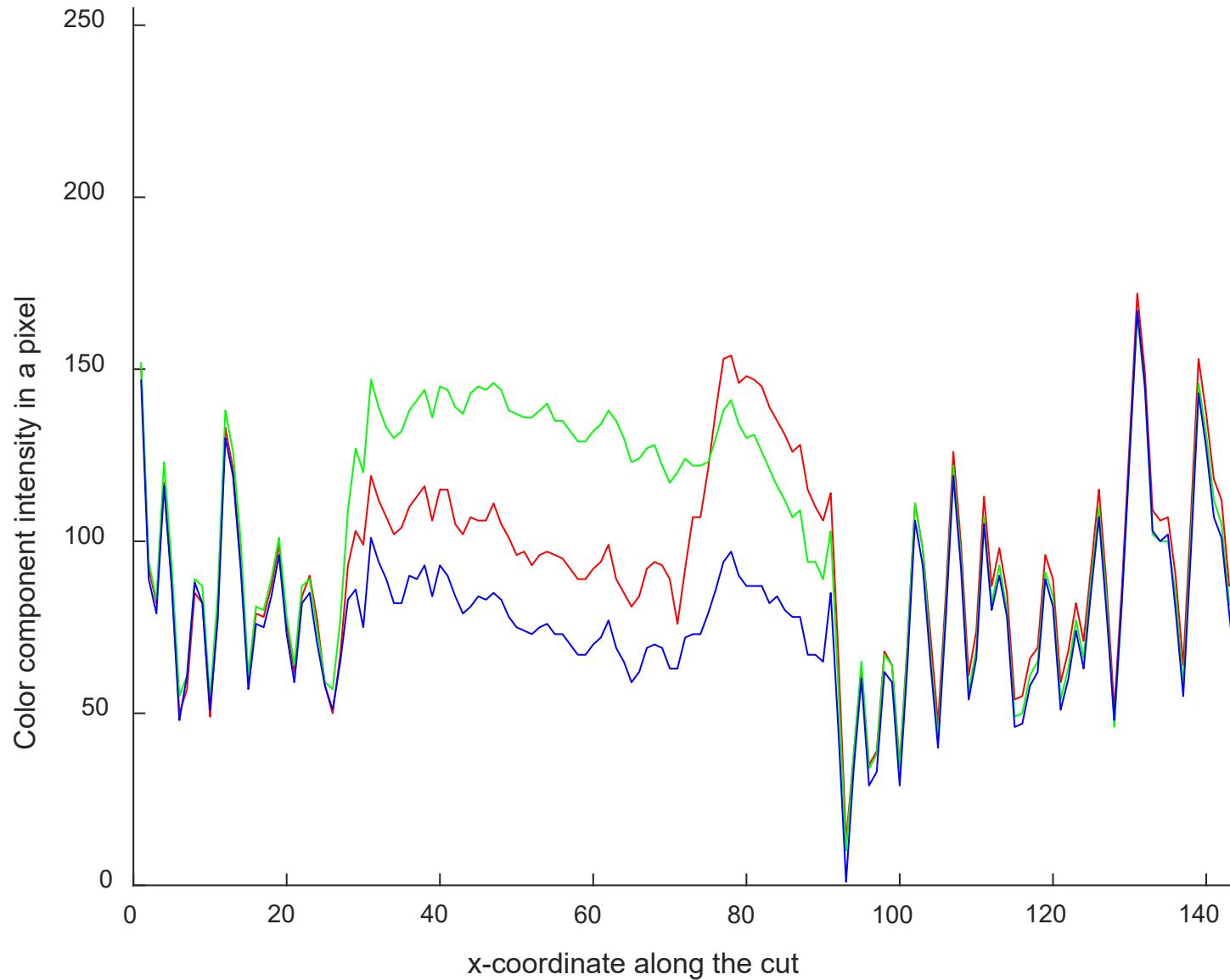
Intensity profile along a straight line segment



Sharpened image



Intensity profile along a straight line segment



More sharpened image



Intensity profile along a straight line segment

