

Základní metody předzpracování obrazu

Hozman, J., katedra radioelektroniky FEL ČVUT v Praze, hozman@feld.cvut.cz

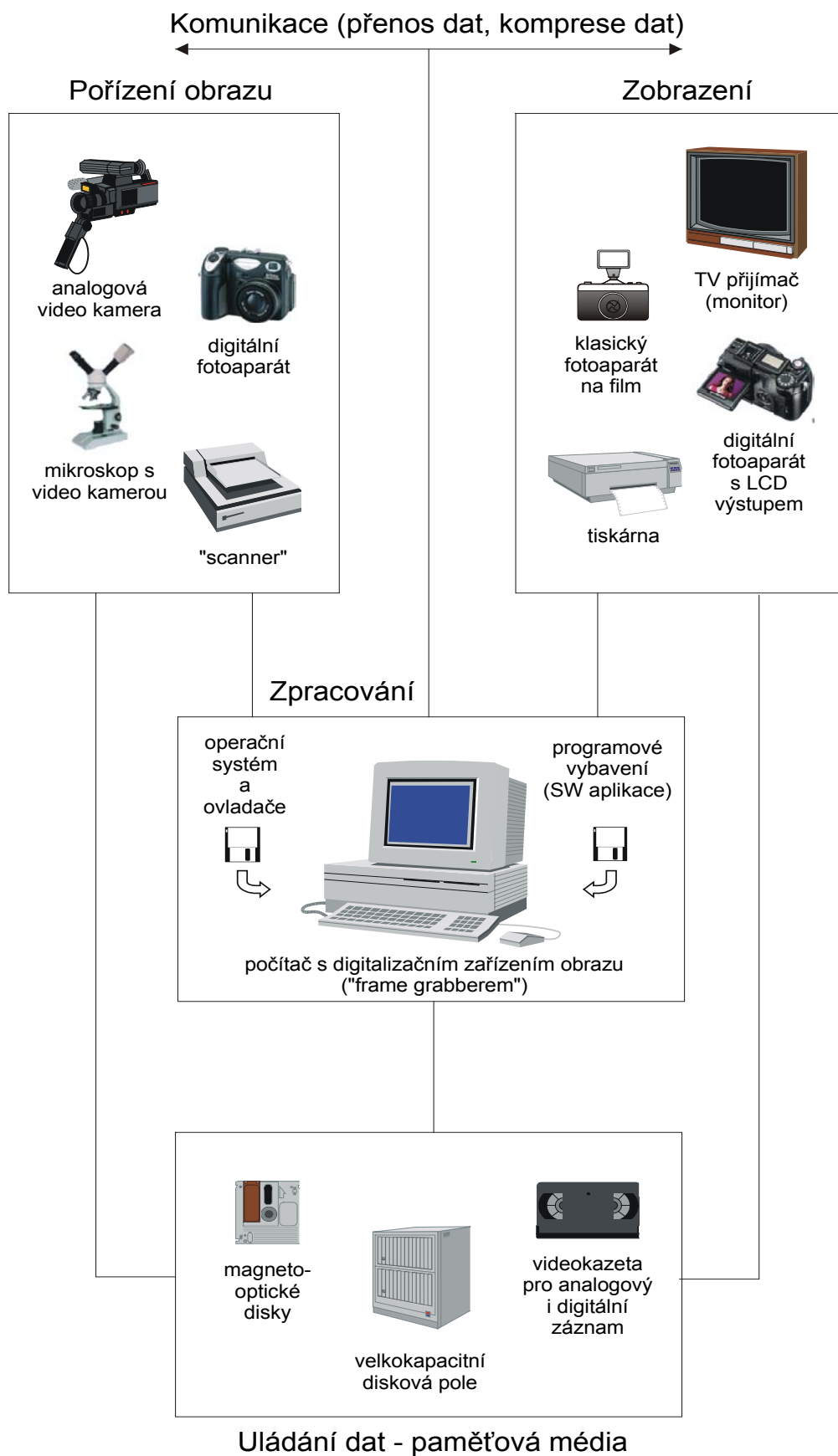
1. Co rozumíme pod zpracováním obrazové informace?

V současné společnosti, která je charakterizována zaváděním velkého množství moderní výpočetní a komunikační techniky, si nelze náš život představit bez toho, že bychom se každodenně nesetkávali s jistou formou prezentace obrazové informace. Nesmíme však zapomínat na klasickou fotografii či fotografický proces, které mají stále ještě své opodstatnění. Nicméně zásadní výhodou počítačového zpracování obrazové informace je, oproti fotografickému procesu, rychlost a citlivost. Nehledě na šetrnější vztah k životnímu prostředí. Typickou ilustrací je snímání objektů za nevhodných světelných podmínek či rozmazání pohybem. V takovém případě jsou nevýhody fotografického procesu velmi značné. Díky pokroku v technice se setkáváme se zpracováním obrazu téměř ve všech oblastech a zejména v lékařství. Typickými představiteli jsou systémy RTG, RTG-TV, CT, MR, NM, PET, SPECT, UZ, mikroskopické a infrazobrazovací, ze kterých jsou nejvýznamnější termovizní. Z tohoto výčtu nás budou nejvíce zajímat mikroskopické zobrazovací systémy, které mají v současné době velmi široké použití v biologii a medicíně. Pod zpracováním obrazu si můžeme představit jistý definovaný proces, v rámci kterého se snažíme ovlivňovat vizuální informaci, zachycenou či vytvořenou technickými prostředky, za účelem získání dalších důležitých poznatků, které nejsou na první pohled obyčejnému pozorovateli zřejmé.

K tomu, abychom lépe pochopili všechny souvislosti v rámci této problematiky, použijeme k dalšímu výkladu základní blokové uspořádání obecného systému pro zpracování obrazové informace na Obr. 1. Pro níže uvedený Obr. 1 uvedeme v tomto odstavci základní popis, charakteristiky a principy činnosti vybraných bloků systému. Takovýto druh systému obecně zajišťuje pořízení, zpracování, uchování či zálohování a vizualizaci obrazu. Celý systém je pak doplněn o komunikační prostředky, které umožňují přenos obrazu (včetně komprese) a interaktivní přístup ke vzdáleným obrazovým databázím.

Pořízení obrazu je prvotní operací a kvalita obrazu je touto operací značně ovlivněna. Nejčastějším prostředkem pro snímání okolní scény je stále analogová videokamera. Takováto kamera převádí snímanou scénu na definovaný typ elektrického analogového signálu. Spojitý signál je nutné převést do tzv. digitální či číslicové podoby, kterou je možné zpracovávat prostředky výpočetní techniky. K tomu slouží tzv. digitalizační zařízení. To může být v zásadě dvou typů podle toho, co je primárním zdrojem analogového obrazu. Pokud se jedná o videokameru či videopřehrávač, pak je takovým zařízením tzv. „Frame Grabber“ začleněný přímo do počítače. Pokud je ale zdrojem např. fotografie či velkoplošný film, pak je nutné použít tzv. „Scanner“. Zmíněná zařízení nám poskytují obraz v tzv. digitální či číslicové podobě. Náznorným příkladem aplikace obou výše uvedených přístupů jsou RTG vyšetřovací systémy. V prvním případě tvoří výstup RTG zobrazovače velkoplošný film, který lze převádět do číslicové podoby výše zmíněným „scannerem“. U téhož systému, který je však doplněn o tzv. převaděč a zesilovač RTG obrazu a televizní systém, je možné RTG obraz snímat televizní kamerou a výstupní elektrický signál pak převést do číslicové podoby pomocí výše zmíněného „Frame Grabberu“. Moderní RTG-TV systémy používají jako snímací prvek televizních kamer tzv. CCD snímače, jejichž signál se velmi dobře zpracovává.

Číslicový obraz v podobě jistého typu datového souboru, uloženého v elektronické paměti, je možné následně **zpracovat** výpočetní technikou, která však může využívat různý operační systém. To samozřejmě s daným technickým vybavením celého systému značně ovlivňuje dosažitelné schopnosti zpracovávat obraz. Např. standardní PC s OS MS DOS má značně omezené možnosti vůči např. tzv. pracovní stanici Silicon Graphics pracující pod OS



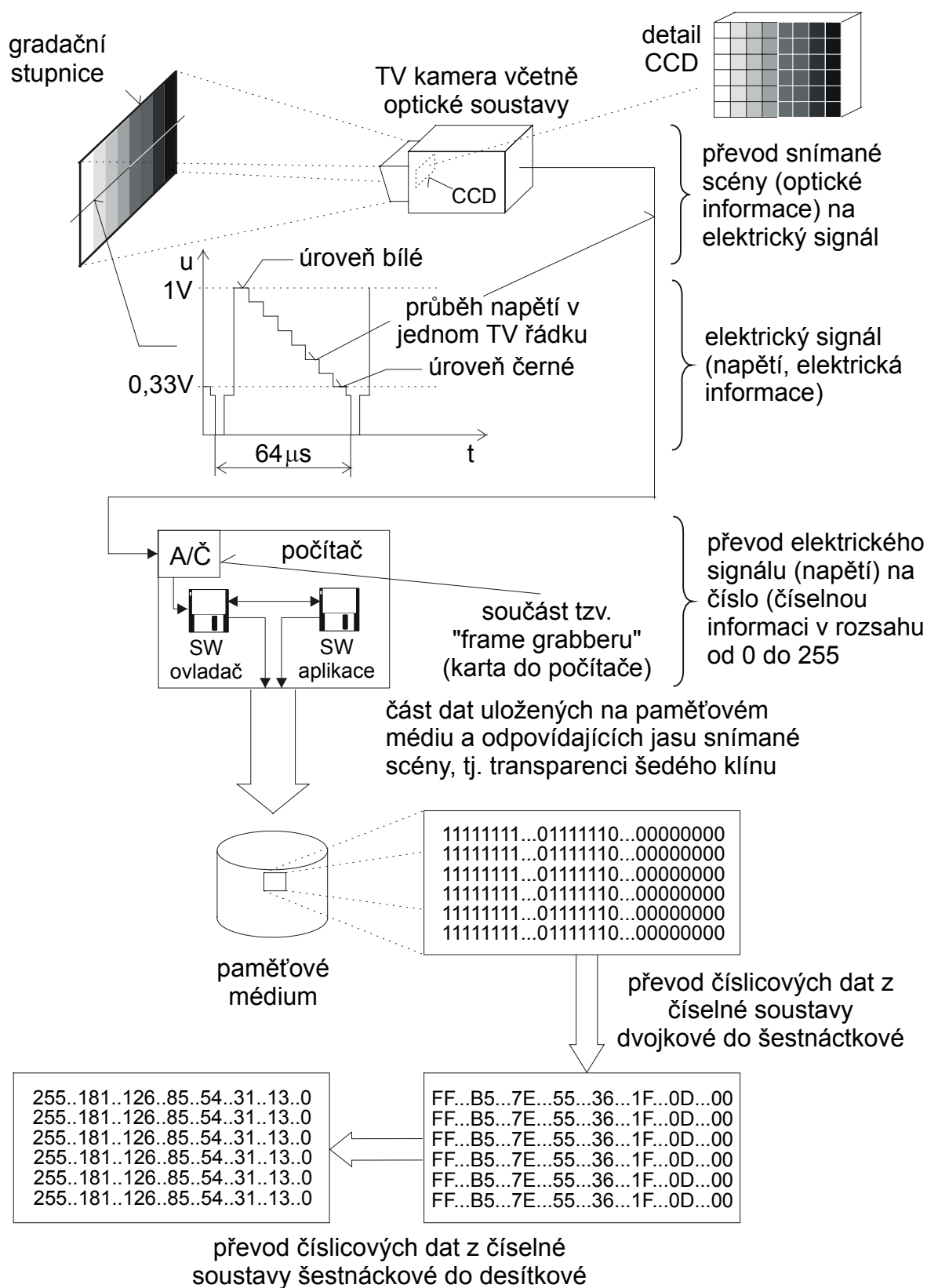
Obr. 1 Základní uspořádání obecného systému pro zpracování obrazu

Vzhledem k velkému objemu dat (viz dále), který je bezprostředním důsledkem nutnosti zachovat i v číslicové podobě co nejvíce informací obsažených v původním analogovém signálu, je velmi důležitou součástí systému ***paměťové médium či archivovací systém***, na které budeme číslicové obrazy před i po zpracování ukládat. V zásadě rozeznáváme tři základní kategorie paměťových médií pro účely zpracování obrazu:

- Pro vizualizaci a potřebnou prezentaci výsledků metod zpracování obrazu je nezbytné **výstupní zařízení**, které v různé kvalitě zobrazuje výsledky. Jedná se především o monitor, který je součástí výpočetní techniky a slouží k bezprostřednímu zobrazení (CRT, LCD, TV, specializované TV monitory s velkým rozlišením). Dalším výstupním zařízením je fotografický přístroj, který zaznamenává výsledky na negativní či pozitivní filmový materiál o různém formátu. Dosti často je fotografický přístroj digitální, což znamená, že pořízené snímky máme uložené v nekomprimované či komprimované podobě na paměťové kartě. Použité rozlišení a systém snímání barevné předlohy jsou pak významnými kritérii kvality. Posledním výstupním zařízením je tiskárna, která poskytuje též bezprostřední výstup, nicméně v kvalitě dané typem použité tiskárny. V současné době se nejčastěji používají pro takovéto účely laserové postskriptové tiskárny, které dnes již běžně dosahují rozlišení 600 a 1200 bodů na palec (anglicky 600 DPI, viz dále). Nej kvalitnější výstupy mají však tzv. voskové tiskárny, které jsou však ojedinělé, zejména z důvodu finanční náročnosti provozu.

Při popisu základního blokového schématu pro počítačové zpracování obrazu jsme se zmínili o tom, že snímaná 3D (trojrozměrná) scéna, např. jednoduchá krychle umístěná na podlaze, je převedena na 2D (dvojměrný) obraz. To se provádí pomocí optické soustavy (objektivu). Skutečná scéna je touto soustavou promítána na obrazový snímač, který realizuje přeměnu jasu snímané scény v daném bodě na hodnotu elektrického napětí a je součástí snímací kamery. Dříve se ve velké míře používaly jako obrazové snímače tzv. snímací obrazové elektronky, čili vakuové prvky. V současné době se pro tyto účely vesměs používají kamery s pevnofázovými (polovodičovými) snímači, nejčastěji s tzv. CCD prvky (Charge Coupled Devices - nábojově vázané struktury). Tyto struktury se vyznačují mozaikovitou

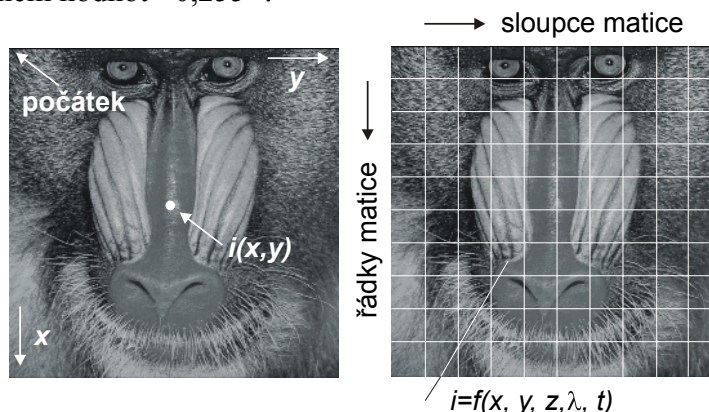
strukturou. V každém bodu takovéto mozaiky, je umístěn světlocitlivý prvek, který generuje množství elektrického náboje úměrné počtu dopadajících světelných fotonů. Tomuto množství elektrického náboje je úměrné i výstupní elektrické napětí. Tzn., že pro snímání ve tmě bude výstupní napětí téměř nulové a pro snímání za velkého osvětlení bude hodnota maximální. Díky mozaikovitě struktuře CCD prvku dochází k tomu, že promítaný obraz je rozložen uvedenou mozaikou (pomyslnou maticí) na soustavu mnoha obrazových bodů. Výstupní elektrický napětíový signál je pak tvořen časovými intervaly, ve kterých se nalézá signál úměrný velikosti osvětlení daného obrazového bodu. Signál odpovídající každému obrazovému bodu je v celém svém intervalu konstantní a během tohoto intervalu je nutné převést konstantní úroveň napětí na číslcovou hodnotu. To je zajištěno pomocí tzv. A-Č (analogově-číslcového) převodníku. Danému rozsahu vstupních analogových hodnot odpovídá interval přirozených čísel, takže obraz je po vyjádření jednotlivých bodů uložen v matici, se kterou budeme nejčastěji pracovat. Celý proces převodu snímané optické informace (svislé pruhy) na číslcový obraz (matice dat) je znázorněn na Obr. 2. Na tomto obrázku máme standardní uspořádání systému, kde vstupní informace získaná analogovou kamerou se CCD snímacím prvkem je převedena pomocí digitalizačního zařízení obrazu, tzv. „frame grabberem“ do číselné podoby, která se uloží jako sekvence dat v podobě např. standardizovaného grafického formátu [2]. Na Obr. 2 je též uvedena část průběhu TV signálu, který odpovídá právě jednomu tzv. TV řádku, který je naznačen na testu (tzv. gradační stupnice) příčnou čarou. Při vlastním převodu snímané optické obrazové informace dochází vlivem optické soustavy snímací kamery ke ztrátě informace o hloubce (na Obr. 4 označená jako souřadnice z). Tzn., že dochází k tzv. prostorově-časové transformaci. Tím, že použijeme rozklad snímané scény na jednotlivé řádky a snímky (pole obsahující daný počet řádek), tak můžeme rozložení obrazové informace ve 2D začlenit do 1D elektrického signálu (TV obrazového signálu). V bloku počítače je znázorněn symbol analogově-číslcového převodníku (A/Č), který hlavní částí tzv. „frame grabberu“, tj. digitalizačního zařízení obrazu. Dále jsou zde vyznačeny symboly pro SW, tj. jednak pro tzv. ovladače, které umožňují, aby programová aplikace měla přístup k danému HW pod daným OS a jednak vlastní aplikační program. Vlastní operace a ukládání dat v počítači probíhají na binární úrovni, což by ovšem pro další zpracování nebylo optimální. Proto, když si zobrazíme obsah souboru s obrazovými daty, tak uvidíme vyjádření dat v šestnáctkové (hexadecimální) soustavě, což je sice efektivní zápis, ale pro naši orientaci nepoužitelný. Proto ještě dále provedeme převod do desítkové soustavy a získáme data v rozsahu $<0,255>$, tj. v zobrazitelném dynamickém rozsahu. Výsledkem je tedy matice dat, jejíž rozměr je ovlivněn použitým standardem video signálu, požadavky použitých algoritmů a též požadavky na jednoduchost digitálních obvodů, zpracovávajících daný signál. Takováto matice má většinou rozměr 256x256 či 512x512 obrazových bodů, tj. jistá mocnina 2 (z důvodu snazšího zpracování metodami zpracování obrazu přímo v počítači). Rozměr matice je dán jednak možnostmi zařízení pro pořízení obrazu a jednak požadavky dané aplikace. Často se pak hovoří o tzv. rozlišovací schopnosti, která je definována např. pro každý zobrazovací diagnostický systém (často v několika směrech). V mikroskopii se jedná o známý parametr FWHM. Nicméně, obecně geometrická rozlišovací schopnost vyjadřuje schopnost systému rozeznat od sebe dva blízké detaily či objekty. Jednotkou je počet párů čar na mm. Např. rozměr matice závisí na tom, jaké zvolíme rozlišení na "scanneru". To se standardně udává v počtech obrazových bodů na palec, např. "200 dots per inch" (200 DPI). Znamená to, že rozměr výsledného číslcového obrazu v pixelech dostaneme vhodným vynásobením rozměrů snímaného obrazu tímto faktorem. Pro názornost si uveďme příklad. Původní snímaný obraz měl rozměr 50,8 mm x 50,8 mm. Vzhledem k tomu, že rozměr je vlastně 2 x 2 palce (25,4 mm), je výsledná velikost číslcového obrazu 400 x 400 obrazových bodů (pixelů). Čím bude vyšší rozlišení, tím budou větší nároky na paměťové médium.



Obr. 2 Převod optické informace na číselný obraz

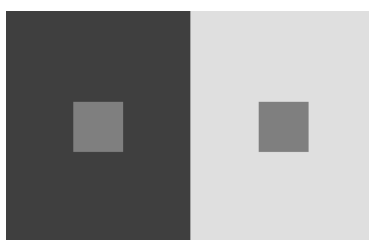
Existují však aplikace, kdy nám postačí velmi malé rozlišení, např. 64x64 pixelů (zejména u dynamických studií v nukleární medicíně) apod. Pro ilustraci uvádíme na Obr. 3 čtveřici obrázků s různým rozlišením. Motiv obrázku byl vybrán z hlediska názornosti vlivu rozlišení na zobrazení detailů v obraze, kterých je zde dostatečné množství.

Prvek matice je obrazovým bodem a velmi často se můžeme setkat s výrazem „pixel“, což vzniklo z anglických slov „*picture element*“. Na Obr. 4 je znázorněn obrázek, kde jsou vyznačeny orientace jednotlivých os, podle kterých se řídí lokalizace vybraného obrazového bodu. Tak např. obrazový bod s polohou (128, 128) bude umístěn na 128 řádku (x) a na tomto řádku ve 128 sloupci (y), tj. uprostřed obrazu. Samozřejmě, že tento bod bude mít i hodnotu, která je v obrázku označena jako $f(x,y,z,\lambda,t)$ a může být např. 95, pokud pracujeme se standardním rozsahem hodnot $\langle 0,255 \rangle$.



Obr. 4 Orientace os při digitální reprezentaci obrazu

Hodnota obrazového bodu (prvku matice, pixelu) je úměrná jasů snímané scény v daném bodě a je dána výše zmíněným A-Č převodníkem. Vzhledem k tomu, že se nejčastěji používá 8 bitový převodník, je výsledný počet úrovní dán jako 2^8 , což je rovno 256. Tzn., že v obrazové matici budeme mít k dispozici hodnoty obrazových bodů v rozsahu 0 až 255. Tmavá místa ve scéně budou obsahovat nízká čísla a světlá místa budou obsahovat vyšší čísla. Hodnotu „0“ používáme pro černou a „255“ pro bílou (u negativu je tomu naopak - viz dále). Pro velkou většinu aplikací je takovýto počet úrovní obrazových bodů postačující, nehledě na fyziologické schopnosti lidského zraku, který takové množství úrovní není schopen rozlišit. To je názorně vidět na Obr. 3. Běžný pozorovatel je schopen rozlišit výrazné rozdíly až mezi obrázky s méně než 64 úrovněmi. To, že se používá právě výše uvedený počet, tj. 256 úrovní, resp. kvantizačních hladin vyplývá z následující úvahy. Počet kvantizačních hladin je především závislý na energetické rozlišovací schopnosti zraku. Jedná se vlastně o vnímání kontrastu a lidský zrak rozezná pouze omezený počet jasových gradací. Je známo, že zrak lépe vnímá rozdíl dvou sousedních jasových oblastí, než jejich absolutní hodnoty. To je také ilustrováno na následujícím Obr. 5. Uvedený poznatek se týká, ale i barevných obrazů.



Obr. 5 Ilustrace vnímání rozdílu jasů dvou sousedních plošek

Vše vychází z Weber-Fechnerova zákona, který lze vyjádřit

$$\frac{\Delta B}{B_0} = k,$$

kde k je zhruba konstantní (0,015 až 0,02),

B_0 je rovnoměrný jas pozadí,

ΔB vnímatelný rozdíl jasu dostatečně velké plochy.

Představíme-li si gradační stupnici o stupních

$$B_{\min} < B_1 < B_2 \cdots < B_i < B_{i+1} \cdots < B_{\max}$$

a platí pro každý stupeň právě

$$\frac{B_{i+1} - B_i}{B_i} = k, \quad \text{tj.} \quad \frac{B_{i+1}}{B_i} = 1 + k,$$

je možné stanovit počet rozlišitelných stupňů

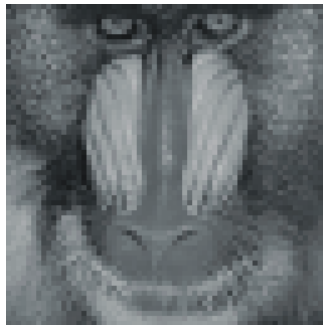
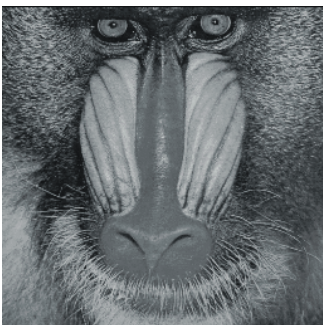
$$\frac{B_{\max}}{B_{\min}} = (1 + k)^n.$$

Je-li znám rozsah jasů, lze určit rozlišitelný počet gradačních stupňů n

$$n = \frac{\log \frac{B_{\max}}{B_{\min}}}{\log(1 + k)}$$

Pro poměr jasů $\frac{B_{\max}}{B_{\min}} = 100$ tak vychází $n=230$. Z výše uvedeného vyplývá, že vyjádření 8

bity, tj. 256 kvantizačními úrovněmi je z hlediska vnímání dostatečné. I přesto se však v některých případech používá A-Č převodník s větším počtem bitů než 8. Typickými představiteli takových aplikací je CT, kdy se používá 10 ($2^{10} = 1024$ úrovní), ale i 12 ($2^{12} = 4096$ úrovní) bitů. Dalšími příklady mohou být mamografie, DSA, astronomie apod. Není to z důvodu pozorování člověkem, ale z důvodu vyhodnocení obrazu počítačem danými metodami zpracování obrazu, které v zásadě nejsou omezeny počtem zpracovávaných úrovní. Dále je to také způsobeno tím, že může dojít k tzv. přetečení rozsahu. Např. v nukleární medicíně je běžné použití 8 bitů, ale vyskytuje se i 16 bitové (stačilo by méně, ale je to výhodné z hlediska zpracování, jedná se o dva bajty čili tzv. slovo). U CT je však situace složitější v tom, že informace o anatomickém složení vyšetřované vrstvy je kódována řadou lineárních součinitelů absorpce RTG záření. Hodnoty absorpce záření uložené v jednotlivých obrazových bodech dvourozměrné matice se podle mezinárodní dohody přepočítávají a vyjadřují v relativních jednotkách tzv. Hounsfieldovy stupnice, jejíž základem je absorpce vody s hodnotou nula HU (Hounsfieldových jednotek). Tkáně s větší absorpcí mají kladné a tkáně s menší absorpcí záporné hodnoty HU. Pro absorpci vzduchu byla stanovena hodnota -1000 HU a hodnota +1000 HU odpovídá absorpci kompaktní kosti. V doporučené literatuře je uvedena stupnice, na které jsou zobrazeny relativní hodnoty absorpce v jednotkách HU pro jednotlivé tkáně a orgány. U současných CT zařízení je možné pracovat s rozsahem hodnot absorpce od -1000 do +3000 HU. V obrazové matici jsou těmto hodnotám přiřazeny odstíny šedi (od bílé až po černou). Jak jsme si však uvedli výše, nejčastěji používáme 256 odstínů šedi. Neexistuje zařízení, které by bylo schopné zobrazit takové množství odstínů šedi a navíc lidský zrak je schopen rozeznat do 64 úrovní šedi. Z toho nám plyne, že je pro zobrazování vždy nutné vymezit pouze jistý rozsah úrovní pomocí tzv. okénka (viz též převodní charakteristiky - LUT). Šířku okénka je možné u přístroje interaktivně měnit v rozsahu od 2 do 4000 HU a jeho střed se může podle potřeby pohybovat mezi hodnotami -1000 až +3000 HU. Pokud zvolíme šířku okénka 256, pak právě jednomu odstínu šedé odpovídá 1 HU. Malým HU se přiřazují v rámci okénka tmavé odstíny šedé a u velkých je tomu naopak.

↓ Vliv rozlišení obrazu ↓		↓ Vliv různých počtů odstínů šedé v obrazu ↓	
↓ 256 x 256 pixelů ↓	↓	↓ 2 odstíny šedé ↓	↓ 4 odstíny šedé ↓
			
↓ 128 x 128 pixelů ↓	↓	↓ 8 odstínů šedé ↓	↓ 16 odstínů šedé ↓
			
↓ 64 x 64 pixelů ↓	↓	↓ 32 odstínů šedé ↓	↓ 64 odstínů šedé ↓
			
↓ 32 x 32 pixelů ↓	↓	↓ 128 odstínů šedé ↓	↓ 256 odstínů šedé ↓
			

Obr. 3 Ilustrace vlivu velikosti rozlišení a počtu zobrazitelných úrovní v obrazu

S hodnotou obrazového bodu souvisí rozdělení obrazů na černobílé, šedotónové a barevné. Černobílý obraz je obraz, ve kterém jsou obsaženy pouze hodnoty 0 a 255 (viz Obr. 3). Jedná se pouze o dvě barvy, resp. odstíny šedé - černou a bílou. Vzhledem k tomu, že potřebujeme vyjádřit dvě úrovně, postačí nám pro reprezentaci jednoho obrazového bodu pouze jeden bit, tj. $2^1 = 2$ úrovně. To má velký význam pro velikost paměti potřebné pro uložení jednoho obrazu a projeví se také při přenosu (doba pro přenos je kratší), viz dále. Šedotónový obraz je charakterizován obsahem úrovní z intervalu $\langle 0, 255 \rangle$. To, že na platformách PC můžeme zobrazovat takovéto obrazy, je zajištěno tím, že ve všech programech pro zpracování obrazu je provedeno ošetření toho, že není k dispozici všech 256 úrovní šedé, ale pouze 64. To souvisí s tím, že pro grafiku na PC je k dispozici pouze 6 bitů. Ve všech programech se pak využívá poznatku, že oko dosti těžko rozezná, pokud daný stupeň šedé bude mít slabý nádech jisté barevné složky. Tímto způsobem se pak dají nahradit chybějící stupně šedi. Barevný obraz vzniká dvěma způsoby. Přirozeně, tj. máme k dispozici kameru (často se třemi prvky CCD), která poskytuje tři barevné signály R (Red - červená, 30% z celkového jasu), G (Green - zelená, 59% z celkového jasu) a B (Blue - modrá, 11% z celkového jasu), které postačují k tomu, abychom vytvořili jejich kombinací téměř jakoukoli barvu. Zastoupení jednotlivých složek je dáno v zásadě spektrální charakteristikou vidění. Vzhledem k tomuto, je pak pro barevný obraz k dispozici v zásadě 3x tolik hodnot než pro šedotónový, protože hodnota každého barevného obrazového bodu musí být definována třemi složkami R, G a B. Druhým způsobem, kterým může barevný obraz vzniknout, je úpravou šedotónového obrazu. Velmi často je třeba zvýraznit v šedotónových obrazech jisté oblasti, hranice apod., k čemuž je umělé zavedení barev velmi vhodné. Z tohoto hlediska rozeznáváme tzv. zobrazení v nepravých barvách a v pseudobarvách. Nepravé barvy se u medicínských obrazů mohou používat pro lepší využití zraku pozorovatele. Protože citlivost čípků lidské sítnice je maximální v zelené oblasti viditelného záření, je optimální při pozorování např. červeného objektu převést tuto barvu na nepravou zelenou barvu. Se zobrazením v pseudobarvách se můžeme setkat tam, kde je požadováno převést původně šedotónový (též monochromatický) obraz na barevný obraz (např. u rentgenogramu, scintigramu, termogramu či UZ snímku, ale i v mikroskopii), protože je velmi obtížné rozeznat od sebe dva velmi blízké odstíny šedé. Naopak lidské oko rozezná podstatně více barev. Umožní se tím vlastně snadnější vyhledání určitého objektu. V takových případech je často na stínítku přístroje zobrazována barevná stupnice, kterých je několik typů a každá z nich má své specifické pojmenování. Velmi dobře je tato situace zřejmá u UZ Dopplerovského zobrazení, kdy vyhodnocujeme objem a rychlost průtoku krve cévami. V takovém případě jsou použity dvě stupnice. Jedna v odstínech modré a druhá v odstínech červené. Dvě barvy proto, že potřebujeme zobrazovat tok krve ve směru k UZ sondě a od sondy. Úloha přiřazení barev k jednotlivým jasovým úrovním není jednoznačná, protože jednorozměrnému vyjádření (jasu) přiřazujeme trojrozměrné vyjádření (barvu, tj. hodnoty R, G a B). Pro zajímavost poznamenejme, že nejznámější pseudobarevné mapování vyskytující se v přírodě, je duha

S velikostí obrazové matice, s vyjádřením hodnoty obrazového bodu a s obsahem obrazu souvisí též požadavky pro přenos a uložení obrazových dat. Tak např. pro šedotónový obraz, který má rozměr 512x512 a je vyjádřen pomocí 256 hodnot, tj. 8 bitů, je nárok na uložení na paměťovém médiu 262144 KBajtů. To platí za předpokladu, že se jedná o tzv. „surová“ data, bez jakýchkoli doprovodných údajů a bez použití komprese dat. V případě přenosu přes modem s přenosovou rychlostí 9600 bauds, tj. 9600 bitů/s, je doba pro přenos obrazu 512x512 okolo 7 minut. To však slouží pouze pro ilustraci. V současnosti se používají přenosové rychlosti okolo 32 až 64 Kbitů/s. Nicméně i přesto v současnosti nabývají na významu metody komprese obrazu, které dokážou snížit původní objem dat velmi výrazně

(význam především pro archivaci dat). Často se využívá poznatku, že velké plochy o jedné úrovni lze zakódovat pomocí souřadnic hraničních bodů a vlastních úrovní.

S výše uvedenými poznatky souvisí též problematika grafických formátů obrazových dat. Komplexně je tato problematika popsána v knize [2]. Nicméně si zde dovolíme uvést nezbytné minimum informací k této problematice a také poznámky, které se budou týkat dále uvedeného příkladu z této oblasti na Obr. 5 (tabulky A, B a C) a 6.

Obrazová data lze ukládat ve formě souboru mnoha způsoby. Jednak ve formě tzv. „surových“ obrazových dat (raw image data), tj. vlastně pixel za pixel, přičemž bitová hloubka úrovně pixelů je závislá na aplikaci a jednak ve formě standardizovaného formátu. Přitom je pro oba způsoby společné, že z hlediska paměťových nároků je výhodné ukládat data do binárních souborů a nikoli do ASCII. Dále je rozdíl v tom, zdali jsme sejmuli statický obrázek, nebo zaznamenali video sekvenci. V obou případech je možné používat různé kompresní metody, ale specifické pro daný typ obrazových dat.

Zcela nejzákladnější dělení formátů je pak na *vektorové* a *bitmapové (rastrové)*. Bitmapové formáty jsou vhodné pro uchování dat reálného světa (fotografie, videozáznamy). Takové soubory obsahují přesnou kopii snímání předlohy, pixel po pixelu. To ale znamená, že výsledné zobrazení je závislé na zobrazovacím zařízení. Běžně používané takové formáty jsou BMP a TIFF, tj. nejčastěji soubory s příponou BMP a TIF. Vektorové formáty jsou určeny především pro čárové, mnohoúhelníkové a textové objekty. Vektorové soubory pak obsahují matematické popisy prvků předlohy. Mají jednodušší strukturu, menší velikost a jsou často uspořádány jako datové toky. Jsou také nezávislé na zobrazovacím zařízení. Běžně je používán formát AutoCad DFX. Existují však také tzv. *metasouborové* formáty, které umožňují, aby v jediném souboru byla uchována jak bitmapová, tak i vektorová data. Typickým představitelem této kategorie je formát WMF. Struktura výše uvedených typů souborů je pak v zásadě tvořena hlavičkou a bitmapovými, či vektorovými daty. Abychom Vám přiblížily na první pohled složitou strukturu takových souborů, uvádíme na Obr. 5 specifikaci BMP formátu (tabulka A), kde je přesně napsáno, kde se jaká položka a o jaké délce má nacházet. Část B na Obr. 5 je pak výsekem hexadecimálního výpisu souboru typu BMP. Jednotlivé významné položky jsou v hlavičce orámovány. V tabulce C je pak ke každé specifikované položce uvedena zjištěná hodnota a případná poznámka. To byl tedy příklad, týkající se hlavičky grafického souboru. Co se týče vlastních bitmapových dat, je příklad uveden na Obr. 6. Opět zde máme výsek hexadecimálního výpisu souboru typu BMP, kde máme vyznačeny hodnoty zvýrazněné na obrázku. Zvláštností formátu BMP a nejen tohoto je to, že za hlavičkou, resp. za tzv. barevnou paletou (vlastně se jedná o LUT pro složky RGB, která předepisuje, jak se má reprodukovat daná hodnota obrazového pixelu na výstupní zařízení, podrobněji v [2]), následuje hodnota levého dolního pixelu. Černé šipky na Obr. 6 tak vyznačují postup dekódování a bílá šipka v obrázku postup jeho vykreslování.

3. Obecný postup při zpracování obrazové informace

Předzpracování obrazu je zcela nezbytnou operací, která se musí provést u všech zpracovávaných obrazů. Je to dáno tím, že téměř nikdy se nám nepodaří pořídit kvalitní obraz bez šumu, bez jakéhokoli rušení, za optimálních světelných podmínek a dalších možných vlivů. V rámci tohoto předzpracování se realizují takové operace jako úprava jasu a kontrastu, úprava histogramu, průměrování několika za sebou jdoucích snímků za účelem potlačení šumu, různé druhy filtrací pro zaostření obrazu, pro odstranění rušení, operace zmenšení, zvětšení, otočení a posunu. Operací vztahujících se k předzpracování je celá řada a nelze zde uvést kompletní výčet. Zde byly vyjmenovány ty nejpoužívanější. Souhrnně lze říci, že předzpracování obrazu je tvořeno souborem základních postupů, které je nezbytné provést, abychom mohli vyhodnocovat informaci obsaženou v obraze, která má pro daný účel význam.

A

Offset bajtu	Délka [B]	Název položky	Význam položky	Implicitní hodnota
0h	2	Identifikace	Identifikace formátu BMP	"BM" = 42h 4Dh
2h	4	Velikost	Velikost souboru v bajtech	
6h	4	Rezervováno	Vyhraženo pro budoucí použití	0
0Ah	4	Offset	Ukazatel na data	Pro 24b/pixel .. 36h
0Eh	4	Velikost	Délka sekce BitmapInfoHeader	28h
12h	4	Šířka	Šířka obrázku	
16h	4	Výška	Výška obrázku	
1Ah	2	Rovin	Počet bitových rovin	1
1Ch	2	Počet bitů	Bitů na pixel	1,4,8,24
1Eh	4	Kompresce	Kompresní metoda	viz text
22h	4	Velikost	Velikost obrázku	pro 24bitů/pixel ..0
26h	4	Rozlišení X	Počet pixelů na 1 metr	Lze 0
2Ah	4	Rozlišení Y	Počet pixelů na 1 metr	Lze 0
2Eh	4	Použitých barev	Celkový počet použitých barev	Všechny ... 0
32h	4	Významných barev	Počet důležitých barev	Všechny ... 0
36h		LUT	Počátek LUT	
viz 0Ah		Data	Rastrová data	

B

```

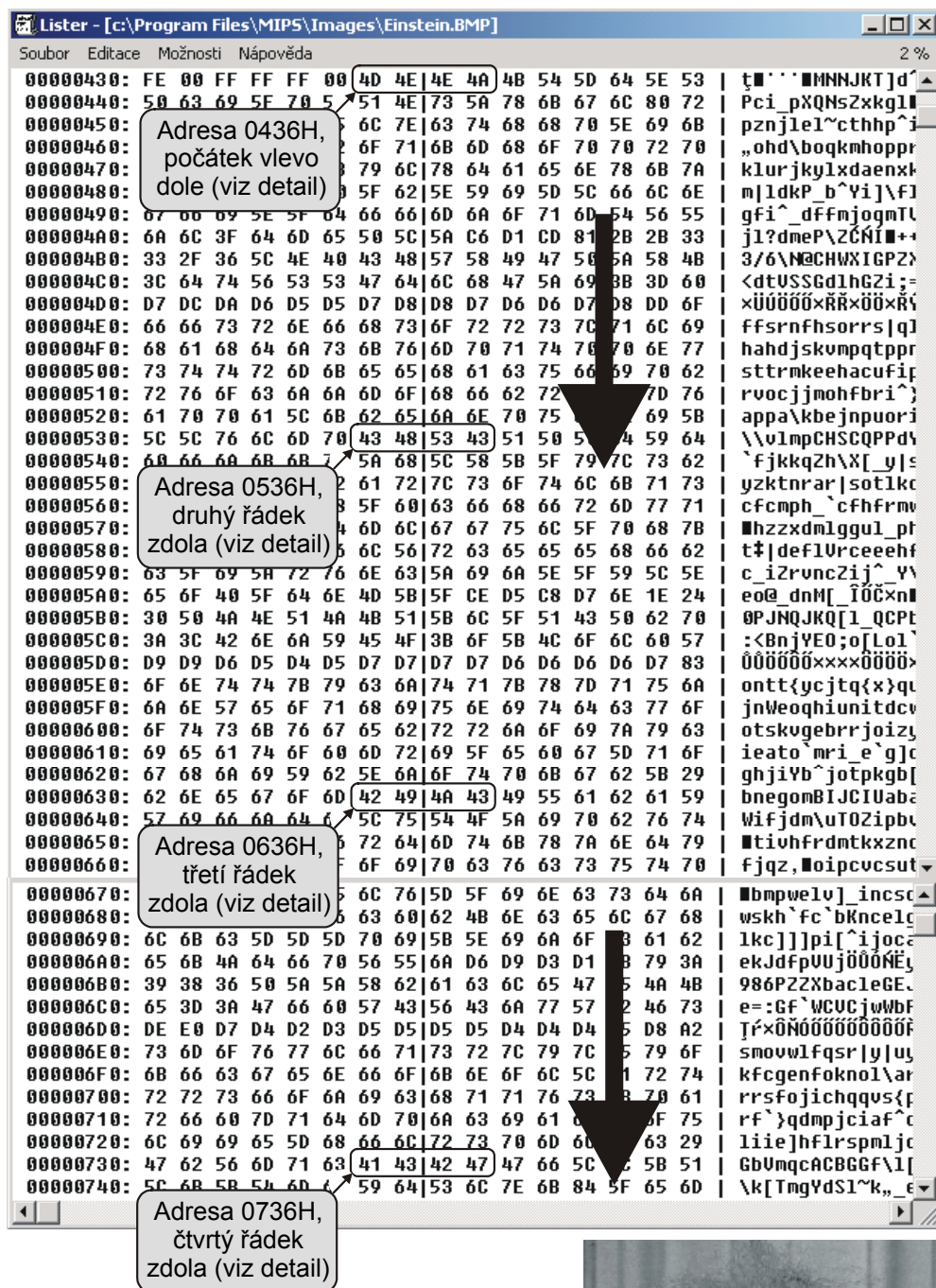
00000000: 42 4D 36 04 01 00 00 00 00 00 36 04 00 00 28 00 | BM6   6  (
00000010: 00 00 00 01 00 00 00 01 00 00 01 00 08 00 00 00 |      ■ ■ ■ ■
00000020: 00 00 00 00 01 00 C4 0E 00 00 C4 0E 00 00 00 00 |      Ä Ä
00000030: 00 00 00 00 00 00 00 00 01 01 01 00 02 02 02 02 |      ■ ■ ■ ■
00000040: 02 00 03 03 03 00 04 04 04 00 05 05 05 00 06 06 | ■ ■ ■ ■ ■ ■ ■ ■
00000050: 06 00 07 07 07 00 08 08 08 00 09 09 09 00 0A 0A | ■ ■ ■ ■ ■ ■ ■ ■
00000060: 0A 00 0B 0B 0B 00 0C 0C 0C 00 0D 0D 0D 00 0E 0E | ■ ■ ■ ■ ■ ■ ■ ■
00000070: 0E 00 0F 0F 0F 00 10 10 10 00 11 11 11 00 12 12 | ■ ■ ■ ■ ■ ■ ■ ■
00000080: 12 00 13 13 13 00 14 14 14 00 15 15 15 00 16 16 | ■ ■ ■ ■ ■ ■ ■ ■
00000090: 16 00 17 17 17 00 18 18 18 00 19 19 19 00 1A 1A | ■ ■ ■ ■ ■ ■ ■ ■
000000A0: 1A 00 1B 1B 1B 00 1C 1C 1C 00 1D 1D 1D 00 1E 1E | ■ ■ ■ ■ ■ ■ ■ ■
000000B0: 1E 00 1F 1F 1F 00 20 20 20 00 21 21 21 00 22 22 | ■ ■ ■ ■ ■ ■ ■ ■
000000C0: 22 00 23 23 23 00 24 24 24 00 25 25 25 00 26 26 | " ### $$$ %%% &&
000000D0: 26 00 27 27 27 00 28 28 28 00 29 29 29 00 2A 2A | & ' ' ' ( ( ( ) ) ) *

```

C

Název položky	Význam položky	Hexadecim. hodn.	Dek. h.	Pozn.
Identifikace	Identifikace formátu BMP	42 4D	66 77	ASCII BM
Velikost	Velikost souboru v bajtech	00 01 04 36	66614	
Rezervováno	Vyhrazeno pro budoucí použití	00 00 00 00	0	
Offset	Ukazatel na data	00 00 04 36	1078	
Velikost	Délka sekce BitmapInfoHeader	00 00 00 28	40	
Šířka	Šířka obrázku	00 00 01 00	256	
Výška	Výška obrázku	00 00 01 00	256	
Rovin	Počet bitových rovin	00 01	1	
Počet bitů	Bitů na pixel	00 08	8	
Kompresa	Kompresní metoda	00 00 00 00	0	
Velikost	Velikost obrázku	00 01 00 00	65536	256x256
Rozlišení X	Počet pixelů na 1 metr	00 00 0E C4	3780	96 DPI
Rozlišení Y	Počet pixelů na 1 metr	00 00 0E C4	3780	96 DPI
Použitých barev	Celkový počet použitých barev	00 00 00 00	0	
Významných barev	Počet důležitých barev	00 00 00 00	0	
LUT	Počátek LUT	00 36	54	
Data	Rastrová data	00 04 36	1078	

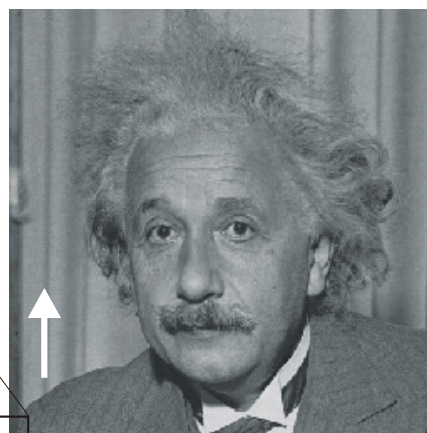
Obr. Specifikace formátu Windows BMP (A), ukázka hlavičky (B) a tabulka specifikace s dekódovanými údaji z hlavičky souboru (C).



vyjádření v šestnáctkové soustavě

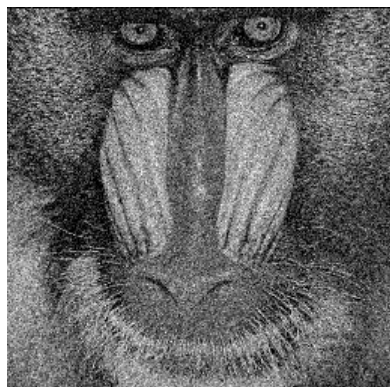
41	43	42	47
42	49	4A	43
43	48	53	43
4D	4E	4E	4A

65	67	66	71
66	73	74	67
67	72	83	67
77	78	78	74



Obr. 6 Konkrétní ukázka postupu dekódování obrazových dat ze souboru BMP

Výstupem předzpracování je pak např. obraz, který má histogram (viz dále) roztažen přes celý rozsah vstupních hodnot a neobsahuje žádné rušení. Na Obr. 7 a 8 jsou uvedeny obrazy, u kterých je značné rušení šumem a rozmazáním. Oba tyto efekty lze potlačit a výsledkem je opět obraz na Obr. 3 (256x256).

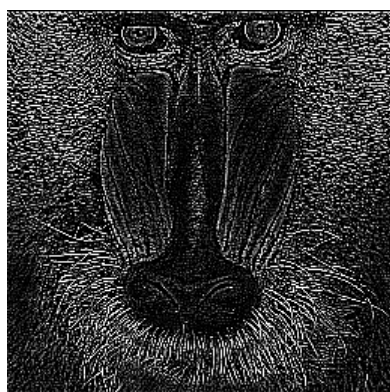


Obr. 7 Obraz se šumem Gaussovým rozložením

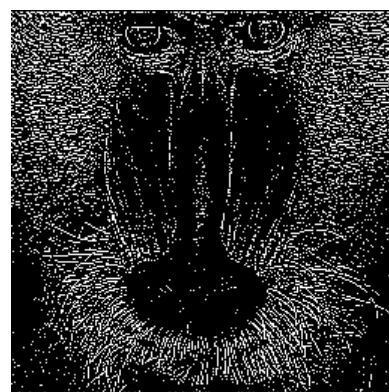


Obr. 8 Rozmazaný obraz pohybem v kladném směru osy x

Vyčlenění objektů zájmu neboli segmentace je dalším postupem, který má své významné postavení při zpracování obrazu. Jedná se o takové postupy, které zajistí, že se následující analýza obrazu bude vztahovat pouze k jeho určitým částem, které přenášejí nejdůležitější informaci. Typickou metodou segmentace obrazu je prahování, které je stručně popsáno v následující části. Dalšími metodami jsou detekce bodu, přímek, hran (viz Obr. 9 a 10) a hranice objektů a oblastí. Výstupem segmentace je obraz, který je typicky černobílý (viz Obr. 10) a obsahuje pouze pozadí (typicky bílá) a objekty zájmu (typicky černá). V praktických úlohách se však nevyhneme zásahu operátora, např. při vymezení tzv. oblasti zájmu (ROI - Region of Interest), nebo při nastavení vhodné prahovací úrovně (viz dále), apod.



Obr. 9 Výstup po detekci hran ve formě šedotónového obrazu



Obr. 10 Obr. 9 po prahování ve formě černobílého obrazu

Popis objektů zájmu je již poněkud pracnější záležitost. Je třeba počítat různé tvarové charakteristiky objektů, statistické momenty včetně invariantních, apod. Výstupem je pak např. tabulka detekovaných objektů s udanými hodnotami tvarových charakteristik, plochy, obvodu, apod. Takže cílem je kvalitativně popsat objekty již v předchozím kroku vyčleněné.

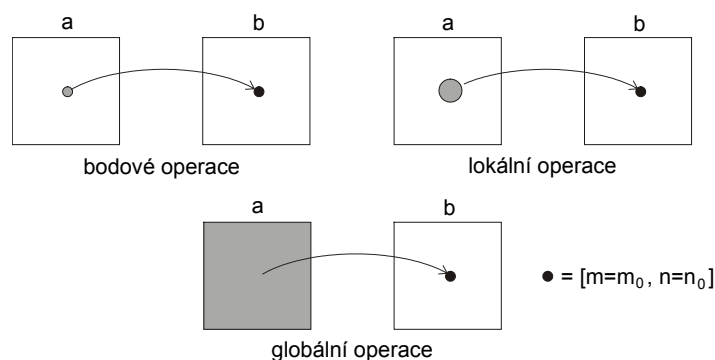
Interpretace výsledků či porozumění obrazu je závěrečná operace v celém řetězci zpracování obrazu. Jedná se vlastně o postup, který jistým způsobem popsané objekty v předchozím kroku, roztrídí do skupin podle společných příznaků (viz též klasifikace).

Výstupem je pak tabulka, která říká, jaké objekty jsou v prvé, druhé, a popř. další skupině. Mnohdy se pro takovéto třídění používá takových nástrojů jako jsou umělé neuronové sítě, vícerozměrné statistické metody, odhady fraktální dimenze a v neposlední řadě i algoritmy fuzzy logiky.

4. Popis a možnosti použití základních metod pro zpracování digitálního obrazu

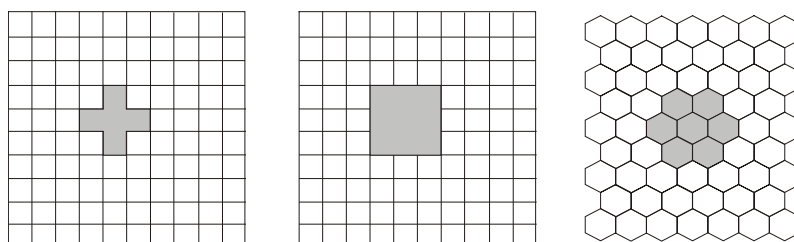
Typy operací, které mohou být aplikovány na digitální obraz (matici obrazových dat) můžeme rozdělit do tří skupin, které jsou zobrazeny na Obr. 11, kde vstupním obraz je označen $a[m,n]$ a výstupní obraz $b[m,n]$. Jedná se o následující operace:

1. **bodové operace** – výstupní hodnota pixelu s definovanými souřadnicemi je závislá pouze na hodnotě vstupního pixelu v téže poloze, ale ve vstupním obrazu.
2. **lokální operace** - výstupní hodnota pixelu s definovanými souřadnicemi je závislá na hodnotách pixelů z definovaného okolí vstupního pixelu v téže poloze, ale ve vstupním obrazu.
3. **globální operace** - výstupní hodnota pixelu s definovanými souřadnicemi je závislá na všech hodnotách pixelů ve vstupním obrazu.



Obr. 11 Kategorie operací aplikovaných na digitální obraz

Lokální operace jsou velmi důležité z pohledu nejčastěji používaných operací v číslicovém zpracování obrazu. Proto je třeba pochopit, jak může být obraz vzorkován, tj. z hlediska použití pravoúhlého či hexagonálního rastru a též z hlediska vazeb, které mohou být v závislosti na těchto rastroch použity v těsném okolí daného bodu, resp. sousedství. Uvedené příklady se uplatňují např. při konvoluční, mediánové filtraci, ale i při morfologických operacích. Graficky je toto zobrazeno na Obr. 12. Hexagonální struktura se jeví jako optimální z hlediska využití prostoru, ale i z hlediska toho, že každý bod má stejnou vzdálenost od všech svých sousedů. Nicméně vlastní metody zpracování takových struktur nejsou zcela obvyklé a přináší některé obtíže. Tato struktura je mimo jiné totožná se strukturou oční sítnice.



Obr. 12 Pravoúhlý rastr 4-sousedství a 8-sousedství, hexagonální rastr 6-sousedství

Použití základních aritmetických operací (sčítání, odčítání, násobení a dělení) a logických operací (logický součin, logický součet, doplněk a další odvozené) prováděných s obrazy je jednou z velkých výhod počítačového zpracování obrazu oproti konvenční fotografii. Nehledě na skutečnost, že zvláště aritmetické operace jsou východiskem pro další pokročilé a užitečné techniky počítačového zpracování obrazu (viz dále).

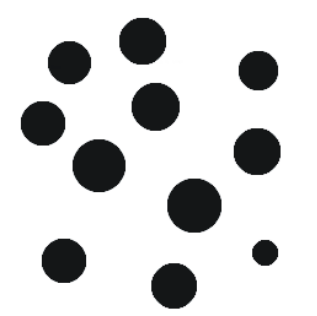
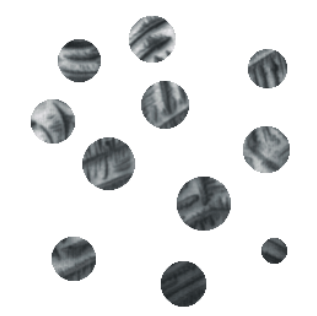
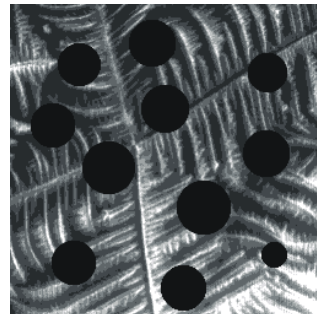
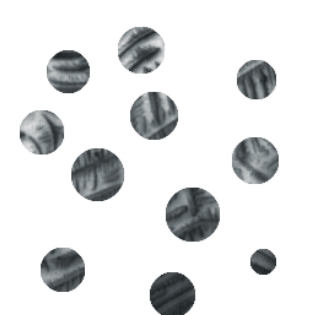
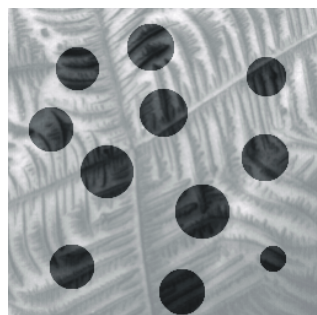
Sčítání obrazů je nejpoužívanější aritmetickou operací z výše uvedeného výčtu. Vzhledem k tomu, že obraz můžeme považovat za matici dat, je sčítání dvou obrazů definováno tak, že prvek jednoho obrazu (matice) se sčítá s polohově odpovídajícím prvkem druhého obrazu (matice). Výsledkem je pak třetí obraz (matice), který je součtem předchozích dvou. To vše je však realizováno za základního předpokladu, že oba obrazy jsou tzv. registrovány (polohově sesouhlaseny). Může však dojít k situaci, kdy k původnímu obrazu chceme přičíst pouze konstantu. Situace je pak obdobná a výsledný obraz (matice) je pak vytvořen tak, že k původnímu obrazu, ke každému prvku takovéto matice, přičteme stejné číslo. V praxi to pak znamená, že přičtení konstanty odpovídá zvýšení jasu výsledného obrazu. Jinými slovy řečeno, výsledný obrázek bude obsahovat více světlých bodů, bude celkově světlejší. Velmi užitečnou technikou pro zpracování obrazů s velkým šumem je průměrování, které využívá kombinaci sčítání obrazů a dělení konstantou.

Odčítání obrazů je obdobná operace jako sčítání. Tuto operaci lze opět použít pro ovlivnění jasu, tentokrát však pro jeho snížení. Odečtením konstanty docílíme, že výsledný obraz bude celkově tmavší než vstupní. Velmi důležitou aplikací odčítání obrazů je tzv. Digitální Subtraktivní Angiografie (DSA). Podstata této vyšetřovací techniky spočívá v tom, že na začátku vyšetření je pořízen snímek dané oblasti bez podání kontrastní látky, tzv. pozadí. Po podání kontrastní látky se v určitých pravidelných časových intervalech pořizují snímky stejné oblasti jako na počátku. Vzhledem k podání kontrastní látky došlo na snímcích ke zvýraznění objektů zájmu (např. krevního řečiště). Nicméně pozadí snímku, které nenese žádnou užitečnou informaci, působí rušivě. Proto se od snímků, které byly pořízeny po podání kontrastní látky, odečte snímek pozadí (viz výše). To se provádí obvykle jen částečně, aby byly naznačeny okolní anatomické struktury. Dalším velmi názorným příkladem je odečtení rušivého pozadí na snímcích z mikroskopů.

Násobení obrazů je velmi užitečnou operací zvláště tam, kde chceme ovlivňovat kontrast obrazu (tj. násobení obrazu konstantou). Podrobněji v odstavci o histogramu obrazu. Nicméně je možné v některých případech využít násobení obrazu sebou samým (jedná se o násobení prvku jedné matice a polohově odpovídajícího prvku druhé matice, nejedná se o algebraické maticové násobení), což může napomoci ke zvýraznění požadovaného rozsahu úrovně intenzit.

Dělení obrazů je méně obvyklá operace, nicméně dělení obrazu konstantou je naopak velmi častá operace. Můžeme se s ní setkat jednak při ovlivňování kontrastu a jednak při tzv. normování dynamického rozsahu při vlastním zobrazování (zachování původního rozsahu hodnot jako u vstupního obrazu).

Vzhledem k tomu, že při všech výše uvedených aritmetických operacích dochází k ovlivňování původního dynamického rozsahu (0 až 255) obrazu, je velmi důležité při zpracování obrazu toto postihnout. V zásadě existují dva základní přístupy. Prvním z nich je tzv. **omezení rozsahu** na 0 při podtečení ($35 - 50 = -15$) a 255 při přetečení ($250 + 40 = 290$). Druhým způsobem je **normování k maximální hodnotě** a to jak v daném obrazu, tak i v dané sérii snímků, např. při dynamické studii při scintigrafii. Tak např. maximální hodnota bude 287, takže každou novou hodnotu dostaneme vynásobením ($255/287$). Při obou přístupech dojde k vždy k jisté změně původního vstupního obrazu. Nicméně, pokud by se neprovedl ani jeden, pak výsledný obraz bude velmi značně znehodnocen. Je to dáno tím, že např. při použití typu proměnné „byte (bajt)“ se jakékoli přetečení projeví jako nová hodnota (např. 35,

Aritmetické operace mezi šedotónovými ("a") a ČB ("b") obrazy a mezi šedotónovými obrazy (bílé odpovídá hodnota 255 (1), černé odpovídá hodnota 0 (0))		
⇓ šedotónový obraz "a" ⇓	⇓ binární (ČB) obraz "b" ⇓	⇓ $ADD(a,b) = a + b$ ⇓
		
⇓ $SUB(a,b) = a - b$ ⇓	⇓ $MULT(a,b) = a \cdot b$ ⇓	⇓ $DIV(a,b) = a / b$ ⇓
		
⇓ $MIN(a,b)$ ⇓	⇓ $MAX(a,b)$ ⇓	⇓ $AVE(a,b) = \text{aritm. průměr}$ ⇓
		
⇓ $OVERLAY(a,b)$ ⇓	⇓ $WEIGHT(25\% a, 75\% b) = 25\% a + 75\% b$ ⇓	⇓ $WEIGHT(50\% a, 50\% b) = 50\% a + 50\% b$ ⇓
		

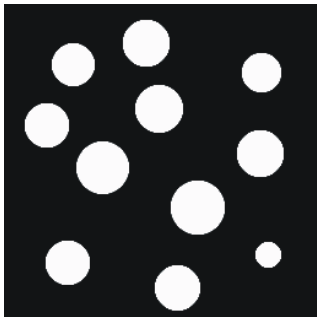
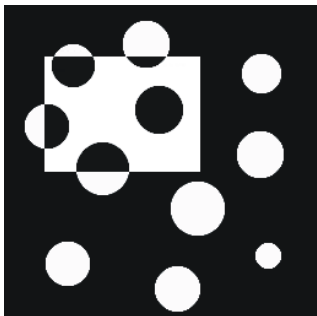
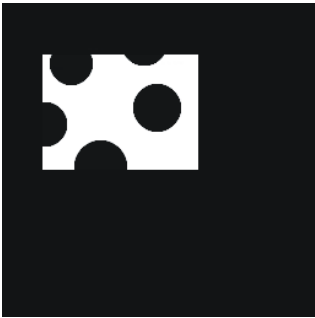
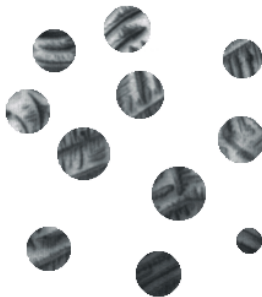
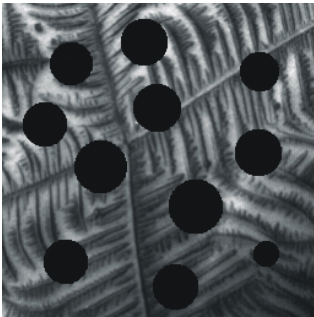
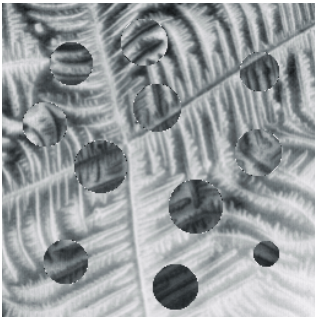
Obr. 13 Ukázka aritmetických operací

viz výše 290), resp. u podtečení jako nová hodnota, ale z opačného konce rozsahu (např. 240, viz výše -15).

Všechny výše uvedené aritmetické operace jsou zde vyloženy pouze na nejzákladnější úrovni. Každá z těchto operací má dalších několik využití v mnoha metodách zpracování obrazu. Případné zájemce o další detaily a využití lze odkázat na doporučenou literaturu.

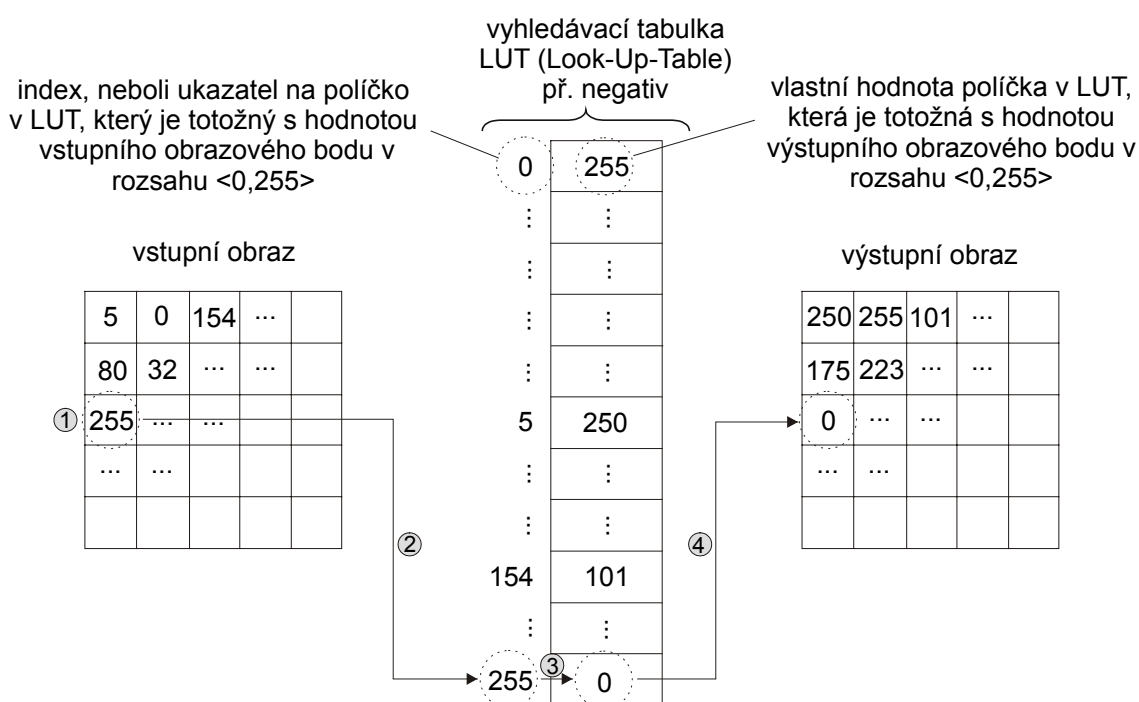
Nejzákladnějšími **logickými operacemi** používanými při zpracování obrazu jsou logický součin (AND - „A SOUČASNĚ“), logický součet (OR - „NEBO“) a doplněk (complement) resp. negace (NOT - „Ne“, např. NOT A či Ne A). Vzhledem k zavedenému anglosaskému označování budeme používat výrazy v závorkách bez uvozovek. Je nutné poznamenat, že z výše uvedených logických operací lze vytvořit minimální množinu (logický součin, doplněk a nebo logický součet a doplněk) logických funkcí, ze kterých lze odvodit všechny ostatní logické funkce. Základní rozdíl mezi aritmetickými a logickými operacemi spočívá v tom, že aritmetické operace aplikujeme na šedotónové obrazy, kdežto logické operace především na dvouúrovňové obrazy (černobílé). Je to dáno tím, že u výše uvedených logických operací se jedná o využití dvouúrovňové logiky (tzv. Boolovské) a tudíž lze jednoduše přiřadit hodnotu „logické 0“ objektu, tj. v příkladu na Obr. 14 černé a hodnotu „logické 1“ pozadí, tj. bílé. V takovém případě lze konstatovat, že výsledek operace logického součinu, tj. průniku množin (AND) je roven „log. 1“ pokud vzájemně si korespondující obrazové body obou obrazů (prvky matic) mají hodnotu „log. 1“ (proto „A SOUČASNĚ“). Pokud alespoň jeden z nich má hodnotu „log. 0“, pak výsledek je „log. 0“. U logického součtu, tj. sjednocení množin (OR) nám pro výsledek „log. 1“ stačí, aby alespoň jedna proměnná měla hodnotu „log. 1“ (proto „NEBO“). O něco složitější je logická funkce XOR (Exclusive OR) - „VÝHRADNĚ NEBO“, která kombinuje všechny tři výše uvedené logické operace. Tuto logickou operaci lze zapsat pomocí logických proměnných jako $Y = A * (Ne B) + (Ne A) * B$, kde „*“ označuje logický součin a „+“ označuje logický součet. Všechny uvedené logické operace s dvouúrovňovými a šedotónovými obrazy jsou ilustrovány na Obr. 14. Velmi užitečnou a názornou pomůckou pro pochopení výše uvedených logických operací je pořízení čtyř průsvitných fólií. Na jedné z nich si nakreslíte obraz A , na druhé obraz B , na třetí Ne A (doplněk A) a na čtvrtou Ne B (doplněk B). Překrytím vždy dvou fólií, ze čtyř výše uvedených, přes sebe, Vám bude výsledek vybrané logické operace srozumitelnější.

Převodní charakteristikou obrazu rozumíme závislost hodnoty obrazového bodu výstupního obrazu na hodnotě obrazového bodu vstupního obrazu. Jedná se tedy o závislost, která je přímo ovlivněna operací, aplikovanou na vstupní obraz. Tak např. pokud výstupní obraz bude tvořen vstupním obrazem, tj. např. při násobení vstupního obrazu „1“, pak je převodní charakteristikou přímka procházející počátkem se směrnici 1 ($y = x$) viz Obr. 15 (1). Při základním vyjádření rovnice přímky ve tvaru $y = kx + q$ je zřejmé, že $k = 1$ a $q = 0$. Pokud však např. chceme realizovat změnu jasu, tj. přičtení (zvýšení jasu - světlejší obraz) či odečtení (snížení jasu - tmavší obraz) konstanty, znamená to, že budeme měnit hodnotu q . Tato operace je ilustrována v Obr. 15 (2). Druhou velmi důležitou operací je změna kontrastu. Zjednodušeně řečeno, kontrast při zpracování obrazu je vyjádřením vztahu mezi dvěma úrovněmi obrazových bodů či jejich přírůstky, nejčastěji odpovídajících dvěma různým objektům či objektu a pozadí. Základní vztah, kterým definujeme tzv. relativní kontrast, je vyjádřen jako $K = (L_{\max} - L_{\min} / L_{\max} + L_{\min}) * 100 [\%]$. Jmenovatel v uvedeném vztahu zavádí tzv. normování, díky kterému dostáváme stejnou hodnotu relativního kontrastu pro různé dvojice hodnot $L_{\max}$ a $L_{\min}$. V převodní charakteristice se změna kontrastu projeví jako změna směrnice k . Již jsme si řekli, že původní šedotónový obraz bez jakékoli změny má směrnici $k = 1$. Zvýšení kontrastu obrazu bude odpovídat zvýšení hodnoty směrnice, tj. $k > 1$ (odpovídá aplikaci operace násobení, viz výše). Naopak snížení kontrastu bude mít za následek snížení hodnoty směrnice, tj. $k < 1$ (odpovídá aplikaci operace dělení, viz výše). Ilustrace této skutečnosti je v Obr. 15 (3). Kombinací předchozích aritmetických operací můžeme

Logické operace mezi binárními (ČB) obrazy (též binární bodové operace) a mezi šedotónovými ("a") a ČB ("b") obrazy (binární hodnota 1 - bílá, binární hodnota 0 - černá)		
↕ binární (ČB) obraz "a" ↕	↕ binární (ČB) obraz "b" ↕	↕ NOT(a) = $\bar{a}$ ↕
		
↕ NOT(b) = $\bar{b}$ ↕	↕ OR(a,b) = $a + b$ ↕	↕ AND(a,b) = $a \cdot b$ ↕
		
↕ XOR(a,b) = $a \oplus b = a \cdot \bar{b} + \bar{a} \cdot b$ ↕	↕ SUB(a,b) = $a \setminus b = a - b = a \cdot \bar{b}$ ↕	↕ OR(a,b) = $a + b$ ↕
		
↕ AND(a,b) = $a \cdot b$ ↕	↕ XOR(a,b) = $a \oplus b = a \cdot \bar{b} + \bar{a} \cdot b$ ↕	↕ SUB(a,b) = $a \setminus b = a - b = a \cdot \bar{b}$ ↕
		

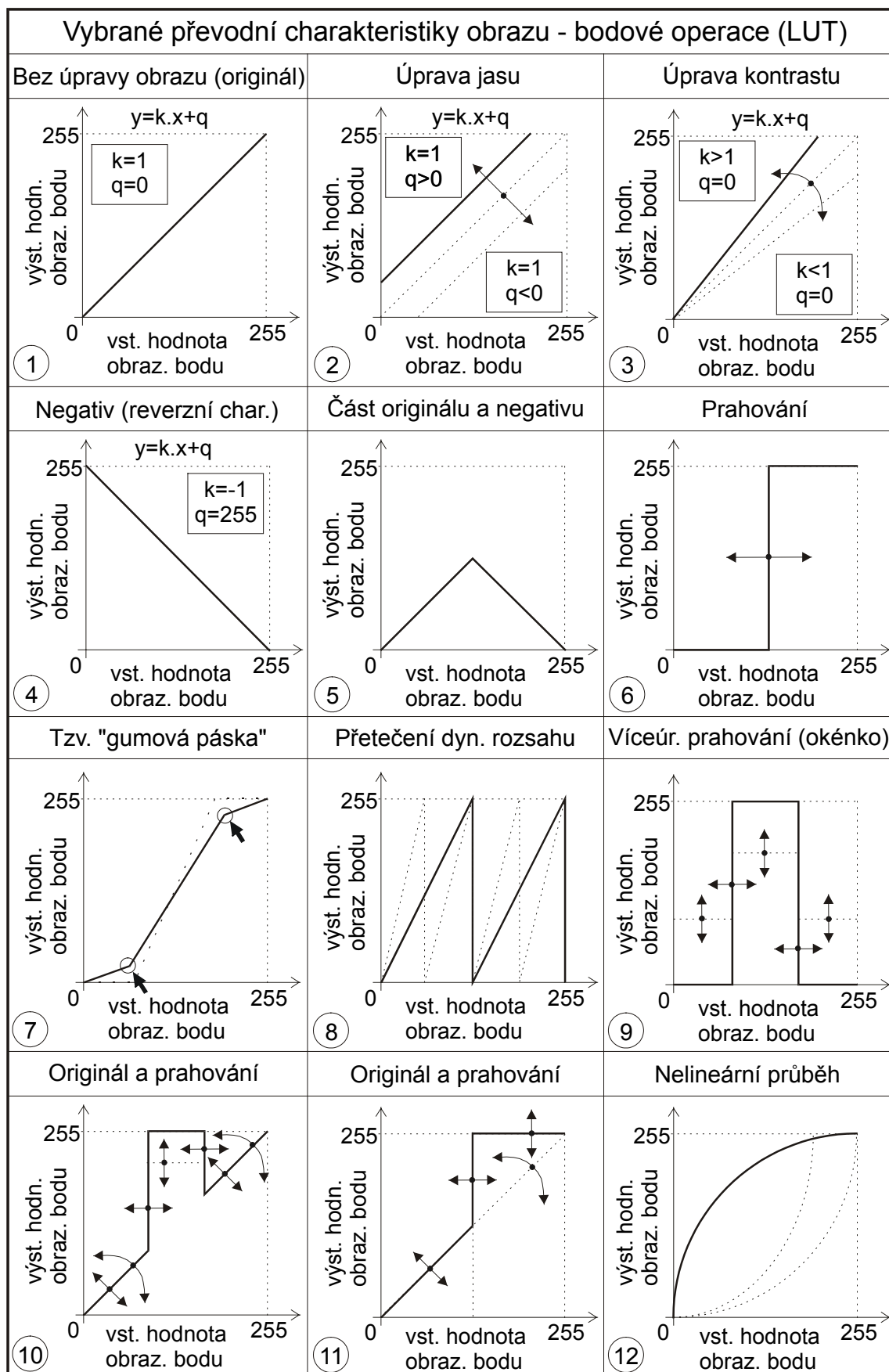
Obr. 14 Ilustrace logických operací na binárních a šedotónových operacích

dosáhnout současné změny jasu i kontrastu. To se také dosti často využívá. Další typy převodních charakteristik vznikají různou kombinací výše zmíněných základních typů (výsledkem je pak převodní charakteristika složená z konečného počtu lineárních úseků), ale existují i zcela odlišné (nelineární převodní charakteristiky). Dalším nejčastějším typem je převodní charakteristika negativního obrazu, tzv. reverzní funkce (pozor na rozdíl od inverzní funkce, např. k $y = x$ je inverzní funkcí $y' = 1/x$). V praxi tato charakteristika znamená, že hodnota výstupního obrazu (0) odpovídá hodnotě (255) vstupního obrazu a naopak. Matematické vyjádření této reverzní funkce je ve tvaru $y = -x + 255$ (viz Obr. 15 (4)). Velmi častou je převodní charakteristika dvouúrovňového obrazu (viz výše). Takováto charakteristika je charakterizována maximálním kontrastem, tj. $k = \infty$. V Obr. 15 (6 a 9) můžeme vidět příklad, u něhož je šipkami naznačeno, že je možné tzv. prahovou hodnotu (viz dále) měnit podle potřeby. Jistou variantou této charakteristiky je tzv. úrovňový řez uvedený v Obr. 15 (9 A 10). Je to jedna z charakteristik, která se využívá především při subjektivním vyhodnocování obrazových dat v biologii a lékařství. Prvá z charakteristik úrovňového řezu je v podstatě charakteristikou dvouúrovňového obrazu, ale s tím rozdílem, že zde není pouze jedna prahová hodnota, ale interval. Druhý typ úrovňového řezu zvýrazňuje určitou oblast úrovní a zachovává přitom podložený původní obraz. Obě úrovně jsou libovolně nastavitelné podle požadavků hodnotícího subjektu. Další velkou skupinu tvoří nelineární převodní charakteristiky (obecná mocnina, logaritmická, exponenciální a popř. uživatelem definovaná převodní charakteristika) viz Obr. 15 (12). Přesný postup implementace LUT v HW i v SW podobě je zachycen na následujícím Obr. 16.



Obr. 16 Ilustrace implementace LUT v HW i SW podobě

Z popisné statistiky je znám pojem **histogramu** jako závislost pravděpodobnosti výskytu dané hodnoty na této hodnotě. Pro jednoduchost se často používá místo pravděpodobnosti výskytu četnost hodnoty v daném souboru hodnot. U obrazu je tomu přesně stejně, protože histogram obrazu není ovlivněn žádným vztahem k prostorovým souřadnicím, tj. k poloze obrazového bodu v obrazu (matici). Souborem hodnot je pro nás obraz, resp. matice dat, kde se nacházejí hodnoty v intervalu <0,255>. Histogram obrazu je pak

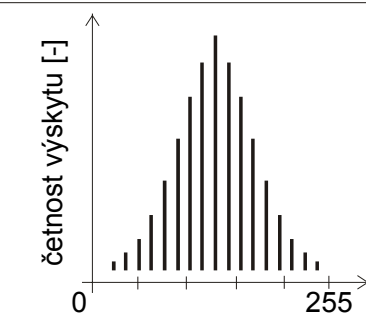
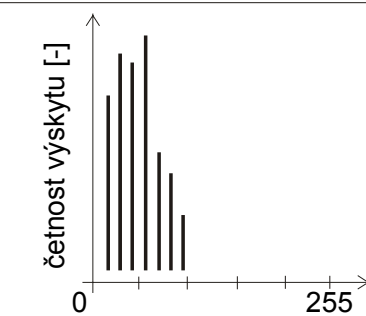
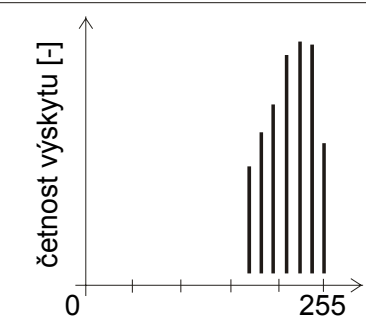
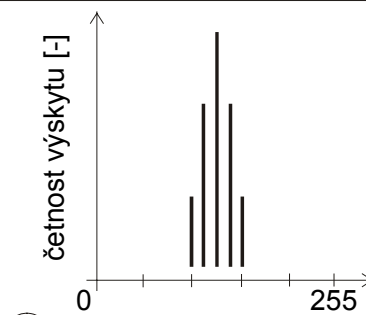
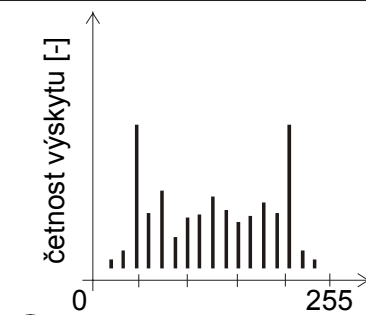
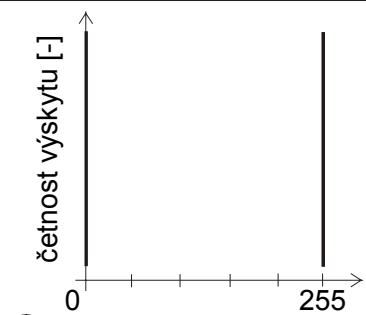
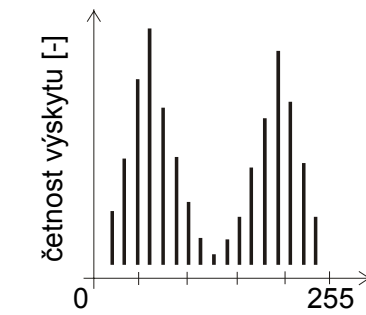
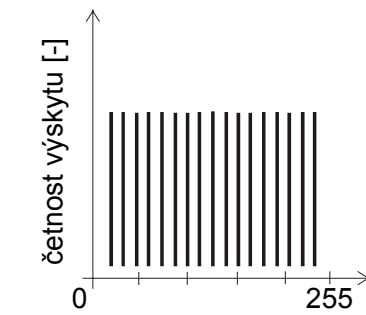
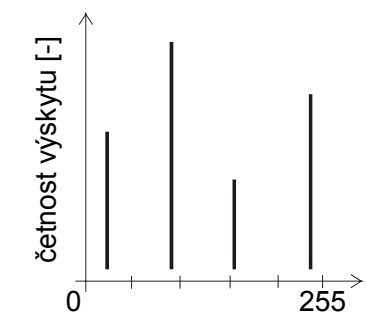
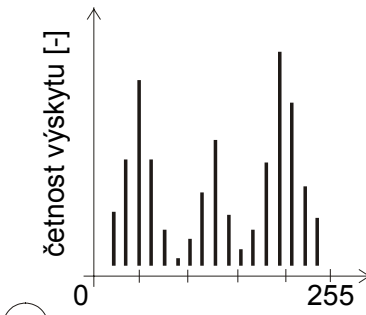


Obr. 15 Přehled převodních charakteristik (LUT)

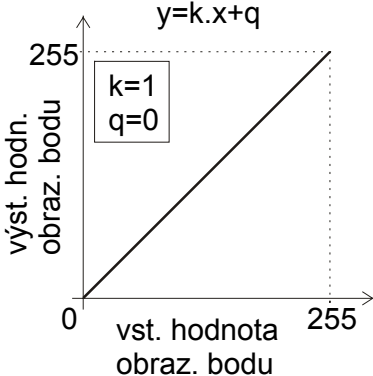
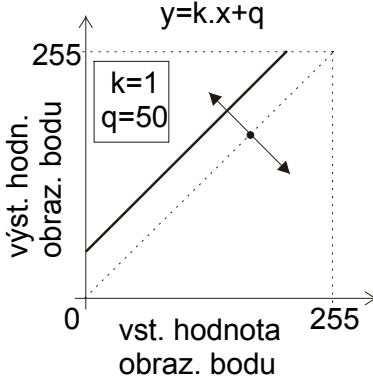
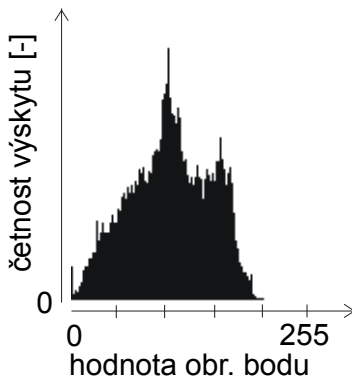
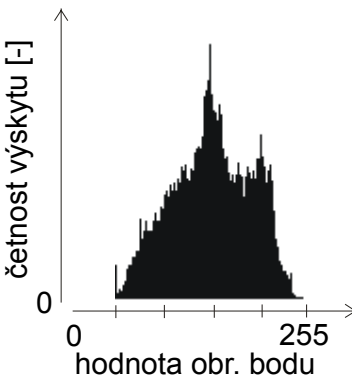
charakteristika, kde na vodorovné ose vynášíme hodnoty obrazových bodů, tj. 0 až 255 a na svislou osu hodnoty četností (počet) jednotlivých úrovní v dané matici. Vzhledem k diskrétnímu vyjádření obrazu (konečný počet úrovní) nemůže být histogram vyjádřen jako spojitá křivka. Nicméně spojením vrcholů jednotlivých četností můžeme získat jistou aproximaci. Součet všech četností v histogramu nám musí dát celkový počet obrazových bodů v daném obraze (matici). Typický příklad histogramu je uveden na Obr. 17 (1). Velmi často se vyskytuje histogram se dvěma vrcholy, které odpovídají dvěma třídám objektů v obraze lišících se jasnem, např. buňky (tmavší hodnoty) a pozadí (světlejší hodnoty) - viz Obr. 17 (7). Takový typ histogramu je jedním ze základních nástrojů pro tzv. optimální prahování (vytváření dvouúrovňového obrazu). Nejsou to pouze tyto dva typy histogramů. Některé histogramy jsou např. velmi úzké a pokrývají pouze malou část celého dynamického rozsahu. Jednotlivé příklady jsou uvedeny na Obr. 17. Zmíněné prahování spočívá v tom, že mezi takovými vrcholy histogramu si zvolíme tzv. prahovou hodnotu či práh. Tato hodnota má pak zásadní význam při aplikaci funkce, která má hodnotu 255 pro pozadí a hodnotu 0 pro objekty v obraze nebo naopak, to je závislé na aplikaci a dalším postupu. Čili všechny obrazové body, které mají hodnotu obrazového bodu menší než je prahová hodnota, tak přináležejí objektům a bude jim ve výstupním obraze přiřazena hodnota černé 0. Naopak všechny obrazové body, jejichž hodnota je větší než prahová hodnota, přináležejí pozadí a bude jim ve výstupním obraze přiřazena hodnota bílé 255. Typ převodní charakteristiky takového obrazu je zobrazen na Obr. 15 (6). Při vhodných světelných podmínkách je vrchol histogramu umístěn ve středu rozsahu vstupních hodnot a je roztažen přes celý takový rozsah. V případech, kdy světelné podmínky byly nevhodné, dochází jednak k posunu vrcholu histogramu mimo střed k černému či bílému okraji a jednak k jeho zúžení. Tím se dostáváme k tomu, jaký je základní vztah mezi převodní charakteristikou, histogramem, jasnem a kontrastem. Veškeré souvislosti včetně použitých operací nám přehledně shrnují následující obrázky Obr. 18 až 21. Nejdůležitějším závěrem z tohoto obrázku je, že pokud měníme jas obrazu, tj. přičítáme či odečítáme jistou hodnotu, měníme průsečík převodní charakteristiky se svislou osou a dále neměníme tvar histogramu, pouze se vrchol histogramu posouvá k černé či bílé. V případě změny kontrastu, tj. násobením či dělením konstantou, měníme směrnici převodní charakteristiky a také měníme tvar histogramu v tom smyslu, že se rozšiřuje či zužuje. Všechny uvedené poznatky je možné nalézt na Obr. 18 až 21. V praxi je tento závěr velmi často používán jako účinný postup pro zdokonalení vstupního obrazu. Představme si, že máme obraz, který byl pořízen za velmi špatných světelných podmínek (v téměř úplné tmě). Histogram takového obrazu je velice úzký a je posunut k hodnotám černé. Pokud je na takovýto obraz aplikována standardní převodní charakteristika, tj. $k = 1$, pak na monitoru téměř nic neuvidíme. S využitím výše uvedených zásad však dosáhneme výrazného zlepšení. Postup spočívá v tom, že si v původním vstupním obraze zjistíme z histogramu první a poslední nenulovou hodnotu četnosti a úroveň, odpovídající těmto četnostem, použijeme jako novou min. a max. hodnotu jasu. Tím dosáhneme znatelného zvýšení kontrastu (zvětšení směrnice), že na obraze je zřetelný původní motiv (viz Obr. 22). Tímto postupem transformace (také roztažení histogramu) se budeme nyní věnovat podrobněji.

Předpokládejme, že digitalizovaný obrázek (matice dat) obsahuje úroveň šedé od a_d (minimální úroveň šedé) do a_h (maximální úroveň šedé), tj. má maximální kontrast daný rozsahem $\langle a_d, a_h \rangle$. My však požadujeme zajistit, aby se tyto meze změnily na $\langle b_d, b_h \rangle$, čímž by se celkový kontrast zvýšil. To vše za předpokladu, že původní meze nepokrývají celý interval stupnice šedi, tj. od 0 do 255. Dále označíme a_x jako úroveň šedé původního obrazu a b_x jako úroveň šedé výstupního obrazu po transformaci. Vztah lze vyjádřit jako:

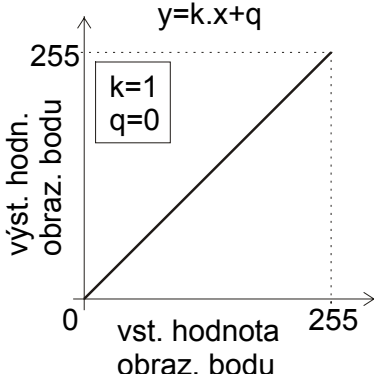
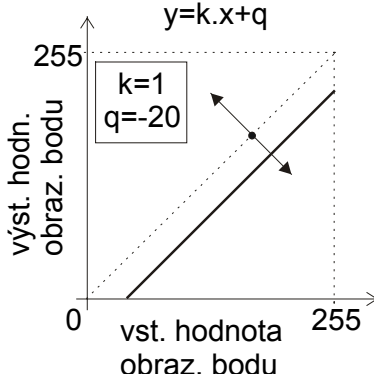
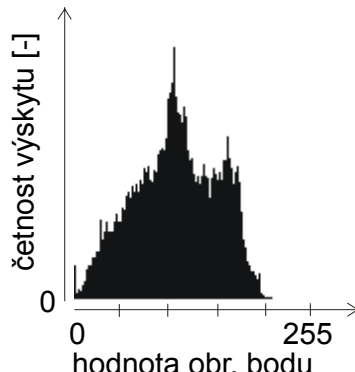
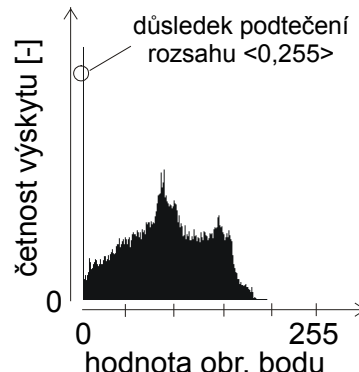
$$b_x = (a_x - a_d) * \left[\frac{(b_h - b_d)}{a_h - a_d} \right] + b_d$$

Různé typy histogramů obrazu a některá důležitá pravidla		
Reálný optimální histogram	Tmavý obraz	Světlý obraz
 četnost výskytu [-] 0 255 hodnota obraz. bodu ①	 četnost výskytu [-] 0 255 hodnota obraz. bodu ②	 četnost výskytu [-] 0 255 hodnota obraz. bodu ③
Obraz s nízkým kontrastem	Obraz s velkým kontrastem	ČB obraz, max. kontrast
 četnost výskytu [-] 0 255 hodnota obraz. bodu ④	 četnost výskytu [-] 0 255 hodnota obraz. bodu ⑤	 četnost výskytu [-] 0 255 hodnota obraz. bodu ⑥
Bimodální histogram	Ideální nereálný histogram	4(x) odstíny(ů) šedi v obr.
 četnost výskytu [-] 0 255 hodnota obraz. bodu ⑦	 četnost výskytu [-] 0 255 hodnota obraz. bodu ⑧	 četnost výskytu [-] 0 255 hodnota obraz. bodu ⑨
Trimodální histogram	Pravidlo č.1 a 2	Pravidlo č. 3 a 4
 četnost výskytu [-] 0 255 hodnota obraz. bodu ⑩	⑪ 1. Histogram nemá souvislost s polohou obrazového bodu v obrazu. 2. Z histogramu lze určit plochu v obrazu, která je určena daným odstínem šedi.	⑫ 3. Součet všech četností v histogramu je roven počtu obrazových bodů v obrazu. 4. Při výpočtu histogramu je vždy nutné na začátku vynulovat pole, kam se jednotlivé četnosti ukládají.

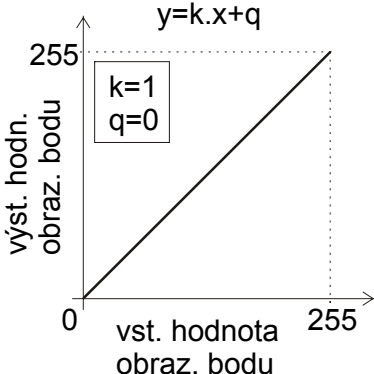
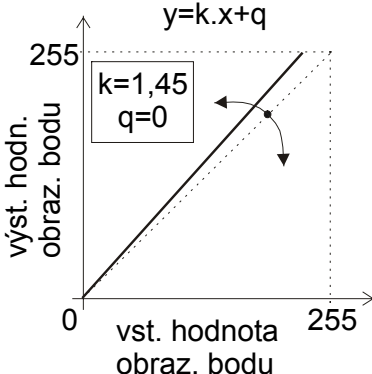
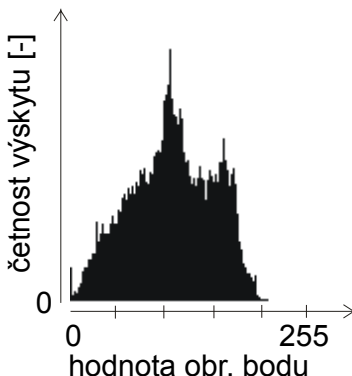
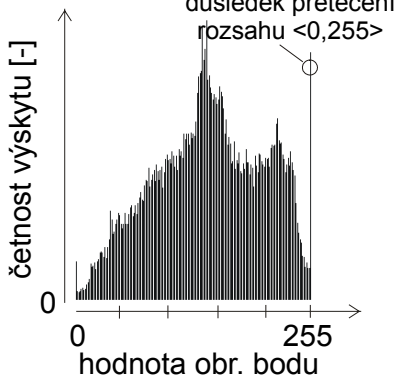
Obr. 17 Přehled jednotlivých typů histogramů

Operace ➞	Přičtení konstanty k původnímu obrazu (zvýšení jasu)																																																			
↓ Subjekt	Stav před operací (vstup)	Stav po operaci (výstup)																																																		
Obráz																																																				
Obrázová data (jemný detail levého oka)	<table><tr><td>56</td><td>53</td><td>48</td><td>49</td><td>101</td></tr><tr><td>38</td><td>22</td><td>69</td><td>16</td><td>36</td></tr><tr><td>76</td><td>84</td><td>196</td><td>27</td><td>21</td></tr><tr><td>22</td><td>18</td><td>109</td><td>14</td><td>16</td></tr><tr><td>74</td><td>27</td><td>14</td><td>8</td><td>22</td></tr></table>	56	53	48	49	101	38	22	69	16	36	76	84	196	27	21	22	18	109	14	16	74	27	14	8	22	<table><tr><td>106</td><td>103</td><td>98</td><td>99</td><td>151</td></tr><tr><td>88</td><td>72</td><td>119</td><td>66</td><td>86</td></tr><tr><td>126</td><td>134</td><td>246</td><td>77</td><td>71</td></tr><tr><td>72</td><td>68</td><td>159</td><td>64</td><td>66</td></tr><tr><td>124</td><td>77</td><td>64</td><td>58</td><td>72</td></tr></table>	106	103	98	99	151	88	72	119	66	86	126	134	246	77	71	72	68	159	64	66	124	77	64	58	72
56	53	48	49	101																																																
38	22	69	16	36																																																
76	84	196	27	21																																																
22	18	109	14	16																																																
74	27	14	8	22																																																
106	103	98	99	151																																																
88	72	119	66	86																																																
126	134	246	77	71																																																
72	68	159	64	66																																																
124	77	64	58	72																																																
Převodní charakteristika																																																				
Histogram																																																				

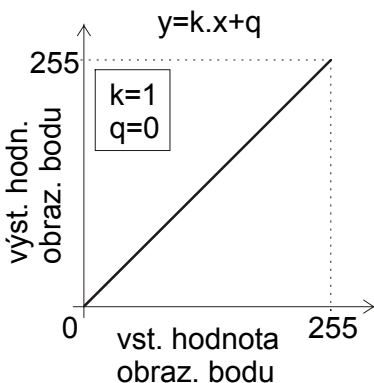
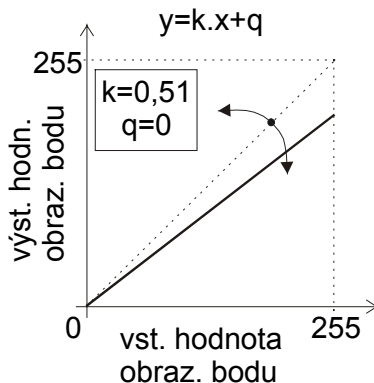
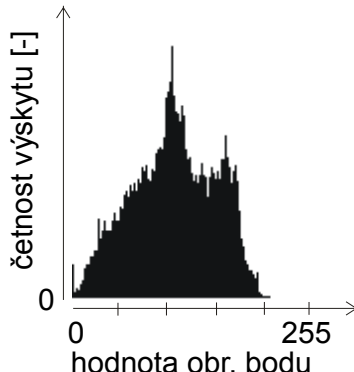
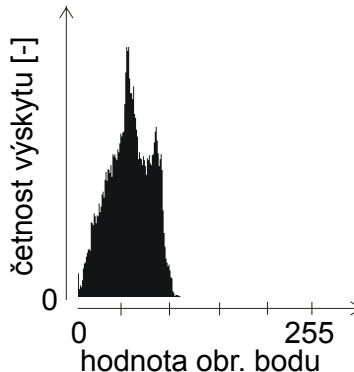
Obr. 18 Přičtení konstanty k původnímu obrazu (zvýšení jasu)

Operace ⇒	Odečtení konstanty od původního obrazu (snížení jasu)																																																			
↓ Subjekt	Stav před operací (vstup)	Stav po operaci (výstup)																																																		
Obraz																																																				
Obrazová data (jemný detail levého oka)	<table><tr><td>56</td><td>53</td><td>48</td><td>49</td><td>101</td></tr><tr><td>38</td><td>22</td><td>69</td><td>16</td><td>36</td></tr><tr><td>76</td><td>84</td><td>196</td><td>27</td><td>21</td></tr><tr><td>22</td><td>18</td><td>109</td><td>14</td><td>16</td></tr><tr><td>74</td><td>27</td><td>14</td><td>8</td><td>22</td></tr></table>	56	53	48	49	101	38	22	69	16	36	76	84	196	27	21	22	18	109	14	16	74	27	14	8	22	<table><tr><td>36</td><td>33</td><td>28</td><td>29</td><td>81</td></tr><tr><td>18</td><td>2</td><td>49</td><td>0</td><td>16</td></tr><tr><td>56</td><td>64</td><td>176</td><td>7</td><td>1</td></tr><tr><td>2</td><td>0</td><td>89</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>54</td><td>7</td><td>0</td><td>0</td><td>2</td></tr></table>	36	33	28	29	81	18	2	49	0	16	56	64	176	7	1	2	0	89	0	0	54	7	0	0	2
56	53	48	49	101																																																
38	22	69	16	36																																																
76	84	196	27	21																																																
22	18	109	14	16																																																
74	27	14	8	22																																																
36	33	28	29	81																																																
18	2	49	0	16																																																
56	64	176	7	1																																																
2	0	89	0	0																																																
54	7	0	0	2																																																
Převodní charakteristika																																																				
Histogram																																																				

Obr. 19 Odečtení konstanty od původního obrazu (snížení jasu)

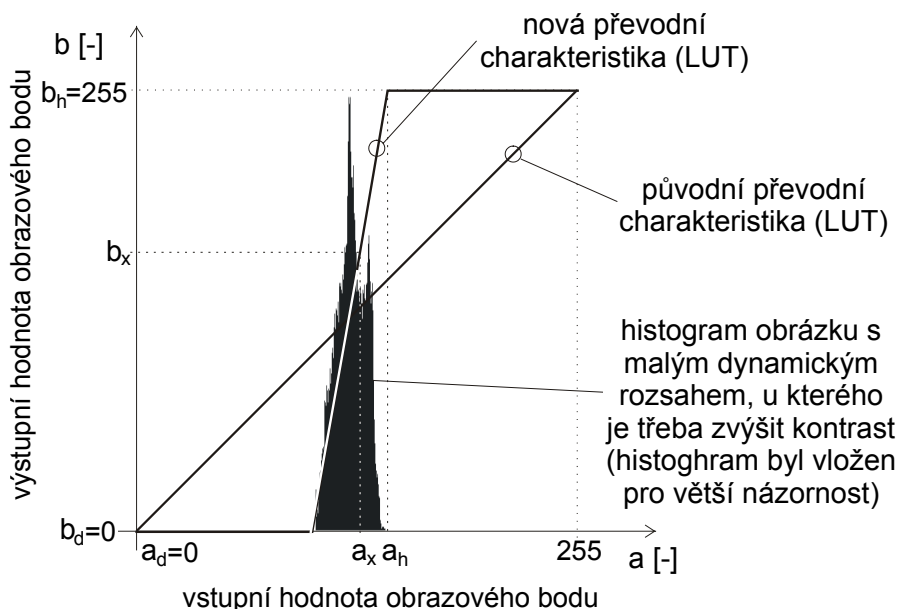
Operace ⇒	Násobení původního obrazu konstantou (zvýšení kontr.)																																																			
↓ Subjekt	Stav před operací (vstup)	Stav po operaci (výstup)																																																		
Obraz																																																				
Obrazová data (jemný detail levého oka)	<table><tr><td>56</td><td>53</td><td>48</td><td>49</td><td>101</td></tr><tr><td>38</td><td>22</td><td>69</td><td>16</td><td>36</td></tr><tr><td>76</td><td>84</td><td>196</td><td>27</td><td>21</td></tr><tr><td>22</td><td>18</td><td>109</td><td>14</td><td>16</td></tr><tr><td>74</td><td>27</td><td>14</td><td>8</td><td>22</td></tr></table>	56	53	48	49	101	38	22	69	16	36	76	84	196	27	21	22	18	109	14	16	74	27	14	8	22	<table><tr><td>80</td><td>76</td><td>69</td><td>70</td><td>145</td></tr><tr><td>54</td><td>31</td><td>99</td><td>23</td><td>51</td></tr><tr><td>109</td><td>120</td><td>255</td><td>39</td><td>30</td></tr><tr><td>31</td><td>26</td><td>156</td><td>20</td><td>23</td></tr><tr><td>106</td><td>39</td><td>20</td><td>11</td><td>31</td></tr></table>	80	76	69	70	145	54	31	99	23	51	109	120	255	39	30	31	26	156	20	23	106	39	20	11	31
56	53	48	49	101																																																
38	22	69	16	36																																																
76	84	196	27	21																																																
22	18	109	14	16																																																
74	27	14	8	22																																																
80	76	69	70	145																																																
54	31	99	23	51																																																
109	120	255	39	30																																																
31	26	156	20	23																																																
106	39	20	11	31																																																
Převodní charakteristika																																																				
Histogram																																																				

Obr. 20 Násobení původního obrazu konstantou (zvýšení kontrastu)

Operace ⇒	Dělení původního obrazu konstantou (snížení kontrastu)																																																			
↓ Subjekt	Stav před operací (vstup)	Stav po operaci (výstup)																																																		
Obraz																																																				
Obrazová data (jemný detail levého oka)	<table><tr><td>56</td><td>53</td><td>48</td><td>49</td><td>101</td></tr><tr><td>38</td><td>22</td><td>69</td><td>16</td><td>36</td></tr><tr><td>76</td><td>84</td><td>196</td><td>27</td><td>21</td></tr><tr><td>22</td><td>18</td><td>109</td><td>14</td><td>16</td></tr><tr><td>74</td><td>27</td><td>14</td><td>8</td><td>22</td></tr></table>	56	53	48	49	101	38	22	69	16	36	76	84	196	27	21	22	18	109	14	16	74	27	14	8	22	<table><tr><td>29</td><td>27</td><td>25</td><td>25</td><td>52</td></tr><tr><td>19</td><td>11</td><td>35</td><td>8</td><td>18</td></tr><tr><td>39</td><td>43</td><td>101</td><td>14</td><td>11</td></tr><tr><td>11</td><td>9</td><td>56</td><td>7</td><td>8</td></tr><tr><td>38</td><td>14</td><td>7</td><td>4</td><td>11</td></tr></table>	29	27	25	25	52	19	11	35	8	18	39	43	101	14	11	11	9	56	7	8	38	14	7	4	11
56	53	48	49	101																																																
38	22	69	16	36																																																
76	84	196	27	21																																																
22	18	109	14	16																																																
74	27	14	8	22																																																
29	27	25	25	52																																																
19	11	35	8	18																																																
39	43	101	14	11																																																
11	9	56	7	8																																																
38	14	7	4	11																																																
Převodní charakteristika																																																				
Histogram																																																				

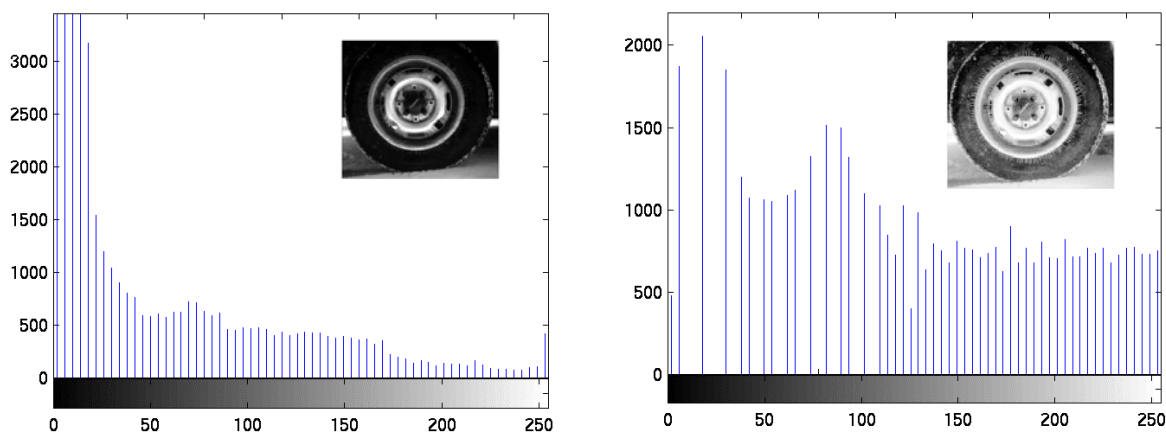
Obr. 21 Dělení původního obrazu konstantou (snížení kontrastu)

Význam jednotlivých členů ve výše uvedeném vztahu je zřejmý z popisu uvedeného výše a z Obr. 22 níže. Souhrnně lze konstatovat, že pokud chceme využít maximální dosažitelný kontrast, pak je nezbytné realizovat výše uvedenou transformaci, která pro nově stanovený rozsah vstupních hodnot realizuje převodní charakteristiku s větší směrnici, tj. s vyšším kontrastem, než v případě původní převodní charakteristiky (s menší směrnici, tj. i kontrastem). Člen v rovnici, který je uzavřen v hranatých závorkách, vypovídá o vztahu kontrastu původního a zpracovaného obrazu. Pokud bychom volili $a_d = 0$ a $a_h = 255$, pak uvedená transformace přiřazuje vstupní hodnotě tutéž výstupní.



Obr. 22 Transformace úrovní šedi do požadovaného rozsahu (roztážení histogramu)

Propracovanější a dokonalejší technikou je tzv. vyrovnání histogramu, což je bodová jasová transformace bez závislosti na pozici bodu v obrazu, která zvyšuje kontrast pro jasové úrovně blízko maxim a naopak potlačuje kontrast blízko minim původního histogramu a které je podrobně popsáno v doporučené literatuře [1] a [4]. Zde jsou také uvedeny další techniky pro změnu tvaru histogramu za účelem zdokonalení vstupního obrazu. Ukázka použití vyrovnání histogramu je ilustrována na Obr. 23.



Obr. 23 Ukázka účinku operace vyrovnání histogramu

Poděkování

V příspěvku byly částečně použity výsledky realizované v rámci VVZ projektu MŠMT MSM 210000012 s názvem Transdisciplinární výzkum v oblasti biomedicínského inženýrství na katedře radioelektroniky FEL ČVUT v Praze.

Použitá literatura:

1. Gonzales, R.C., Woods, R.E. *Digital Image Processing*. Addison-Wesley: New York, 1992.
2. Murray, J.D., Van Ryper, W. *Encyklopedie grafických formátů*. Druhé vydání. Computer Press: Brno, 1997.
3. Hlaváč, V., Šonka, M.: *Počítačové vidění*. Grada: Praha, 1992. 272 s.
4. Hozman, J., Bernas, M., Klíma, M., Dvořák, P.: *Zpracování obrazové informace*. (Skriptum). České vysoké učení technické v Praze. Vydavatelství ČVUT: Praha, 1996. 177 s.
5. Drastich, A.: *Zobrazovací systémy v lékařství*. (Skriptum). Vysoké učení technické v Brně. Vydavatelství VUT: Brno, 1990. 512 s.