

UVOD

Digitalna obrada slike je multidisciplinarna oblast koja pokriva različite aspekte optike, elektronike, matematike, fotografije i računara.

Počeci digitalne obrade i prenosa slike vezani su za rane dvadesete godine prošlog vijeka. Prvi sistem za prenos digitalne slike, *Bartlane cable picture transmission system*, omogućavao je prenos digitalne slike između Londona i New Yorka. Kvalitet slike je bio slab, sa samo pet nivoa sivila, da bi ubrzo nakon toga kvalitet slike "popravljen", te su se slike prenosile sa petnaest nivoa sivila. Tipičan izgled prvih digitalnih slika koje su se prenosile ovim sistemom prikazan je na Slici 1.



Slika 1. Izgled prvih digitalnih slika

Pad cijena računarske opreme, porast raspoložive opreme za digitalizaciju i prikaz slike, novi tehnološki trendovi kao što su: paralelno procesiranje, CCD (Charge Coupled Devices) uređaji za digitalizaciju, displeji visoke rezolucije i jeftine memorije za spremanje ogromnih količina podataka stalno doprinose sve bržem razvoju ove oblasti.

Oblasti primjene digitalne obrade slike su mnogobrojne:

Komunikacije i informacione tehnologije

- Prenos slike,
- Televizija, fax, multimedia,
- Kompresija slike,
- Arhiviranje slike,
- Baze slika;

Medicinske primjene

- Radiologija,

- Magnetna rezonancija,
- Kompjuterizovana tomografija,
- Poboljšanje kontrasta slika,
- Pseudokoloriranje slika za bolju vidljivost,
- Rekonstrukcija slika iz projekcija (CT),
- Analiza slika;

Daljinska snimanja

- Snimanje slika sa velike udaljenosti (sateliti, avioni),
- Geologija (nalazišta nafte i minerala),
- Poljoprivreda (bolesti, prinosi, vegetacija),
- Meteorologija (oblaci, atmosfera),
- Ekologija (zagađenja, oceani, ledenjaci),
- Šumarstvo,
- Vojne i policijske primjene;

Astronomija

- Poboljšanje slika zvijezda dobivenih teleskopima,
- Uklanjanje optičkih izobličenja,
- Uklanjanje izobličenja usljed atmosferskih uslova;

Industrijske primjene

- Nadzor i mjerenja proizvodnih procesa,
- Industrijska kontrola kvalitete,
- Upravljanje proizvodnih procesa,
- Robotika: autonomna vozila,
- Robotika: inteligentni strojevi;

Automatska iterpretacija slike

- Prepoznavanje slova (automatic character recognition),
- Industrijske aplikacije (roboti za sastavljanje i inspekciju proizvoda),
- Prepoznavanje objekata u vojnim primjenama,
- Automatska obrada otisaka prstiju,
- Interpretacija medicinskih slika;

Ostale primjene obrade slike

- Nuklearna fizika,
- Biologija,
- Mikroskopija (histologija),
- Radar, sonar (poboljšanje slika),
- Vojne primjene (navođenje, praćenje letjelica),
- Policijske primjene (otisci prstiju, slike osoba).

Na slikama 2-4 prikazane su neke tipične primjene digitalne obrade slike.



Slika 2. [11] Uklanjanje šuma. S lijeva na desno: originalna slika, slika sa šumom i slika nakon uklanjanja šuma



Slika 3. [11] Promjena osvjetljenja i kontrasta. Lijevo: slika sa lošim kontrastom. Desno: slika nakon poboljšanja kontrasta.



Slika 4. [11] Uklanjanje zamućenosti. S lijeva na desno: originalna slika, zamućena slika, slika nakon uklanjanja zamućenosti.

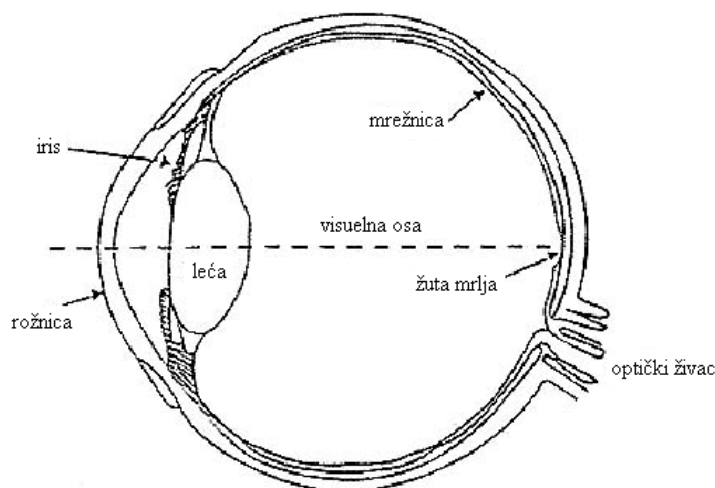
PERCEPCIJA SLIKE

Mnoge aplikacije koje koriste obradu slike generišu sliku koju će posmatrati čovjek (za razliku od, recimo, automatske inspekcije u industriji). Zbog toga je veoma važno poznavati karakteristike i ograničenja ljudskog vida – “prijemnika” 2D signala. Važno je znati da:

- Ljudski vizuelni sistem nije dovoljno ispitan,
- ne postoji objektivna mjera kvaliteta slike koja odgovara ljudskoj prosudbi o kvalitetu slike,
- “tipični” posmatrač ne postoji.

Unatoč svemu, istraživanja u oblasti perceptualne psihologije obezbjeđuju neka važna sagledavanja vizuelnog sistema. Uopštena građa ljudskog oka je prikazana na Slici 5. Retina ljudskog oka je prekrivena fotoreceptorskim ćelijama. Fotoreceptorske ćelije apsorbiraju svjetlost od slike koju na retinu fokusiraju leća i rožnica (cornea). One generišu nervne impulse koji putuju ka mozgu kroz optičke nerve od kojih se svaki sastoji od oko milion vlakana. Frekvencija ovih impulsa je funkcija osvjjetljenosti retine.

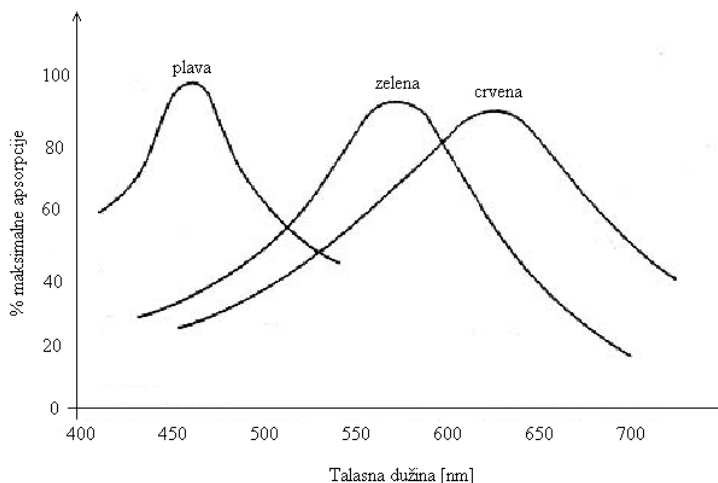
Fotoreceptorske ćelije su najgušće u području žute mrlje (fovea). Pri jakoj svjetlosti, otvor zjenice je mali i svjetlost je fokusirana na žutu mrlju, što omogućava dobro razaznavanje detalja. Pri slaboj svjetlosti, otvor zjenice je veći, te je svjetlost rasuta po većem dijelu retine i slika je loše fokusirana.



Slika 5. Uproštena građa ljudskog oka

Fotoreceptorske ćelije su mješavina ćelija dva tipa: štapića i čunića (konusnog oblika), tako nazvanih po njihovom obliku. Štapići su mnogo osjetljiviji i omogućavaju monohromatski vid u noći. Čunići omogućavaju gledanje u boji, ali samo pri visokom nivou osvjjetljenosti. Postoje tri tipa konusnih ćelija. One dijele vidljivi dio spektra u tri opsega: crveni, zeleni i plavi. Zbog toga su ove tri boje označene kao osnovne boje ljudskog vida. Slika 6 prikazuje osjetljivost ova tri tipa konusnih ćelija po talasnim dužinama svjetlosti iz vidljivog dijela spektra.

Zasnovano na psihofizičkim mjerenjima, CIE (Commision Internationale de l'Eclairage) je prihvatila ove krive kao kao krive osjetljivosti "tipičnog" posmatrača za tri navedena pigmenta.



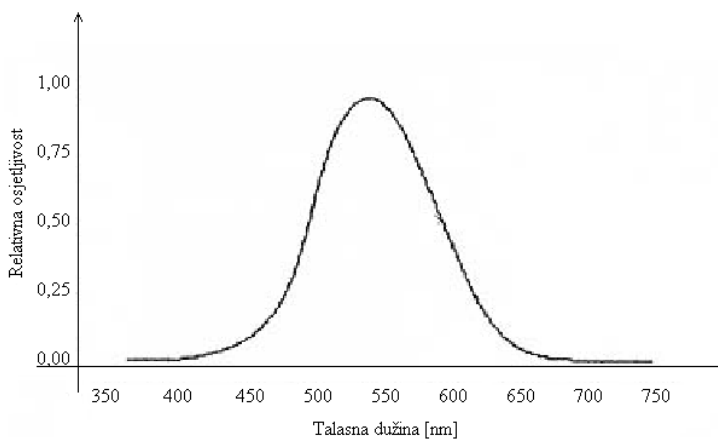
Slika 6. [14] Osjetljivost fotoreceptorskih ćelija ljudskog oka

Subjektivni osjećaj intenziteta svjetlosti

Postoje različiti načini da se opiše osjetljivost ljudskog vidnog sistema. Za početak, pretpostavimo da je intenzitet osvjetljenosti homogenog regiona slike funkcija talasne dužine (boje) data sa $I(\lambda)$. Dalje, pretpostavimo da je $I(\lambda) = I_0$ konstanta.

Osjetljivost na boje (talasnu dužinu svjetlosti)

Percepcija intenziteta svjetlosti u funkciji talasne dužine (*spektralna osjetljivost*) za "tipičnog posmatrača" je prikazana na Slici 7.



Slika 7. [14] Percepcija "tipičnog posmatrača" u funkciji talasne dužine

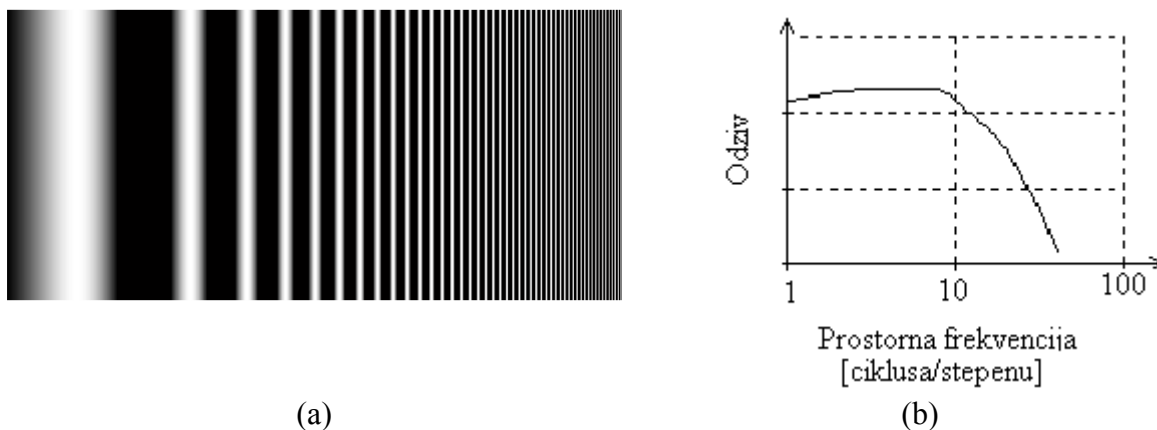
Osjetljivost na promjenu intenziteta svjetlosti

Ako variramo intenzitet svjetlosti jedne talasne dužine, onda, u dobroj aproksimaciji, odziv vidnog sistema R je proporcionalan logaritmu intenziteta. To je poznati Weber-Fechner-ov zakon:

$$R = \log(I_0).$$

Osjetljivost na brzinu promjene u prostoru

Ako se konstantni intenzitet u prostoru zamijeni sinusoidalnim, sa rastućom horizontalnom prostornom frekvencijom kao na Slici 8(a), moguće je odrediti osjetljivost na brzinu promjena u prostoru. Rezultat psiholoških testova izvedenih na velikom broju ispitanika prikazan je na Slici 8(b).



Slika 8. (a) Test slika i (b)[14] osjetljivost na promjene u prostoru

Pretpostavimo da se idealni monitor nalazi na udaljenosti od 50 cm od posmatrača. Prostorna frekvencija koja će dati maksimalni odziv je 10 ciklusa po stepenu, Slika 8(b). Jedan stepen na 50 cm se preslikava u $50\text{cm} \cdot \text{tg}(1^\circ) = 0.87\text{cm}$ na ekranu računara. Prema tome, frekvencija maksimalnog odziva iznosi $f_{\text{max}} = 10\text{cycles}/0.87\text{cm} = 11.46\text{cycles/cm}$ sa date distance.

Kontrast

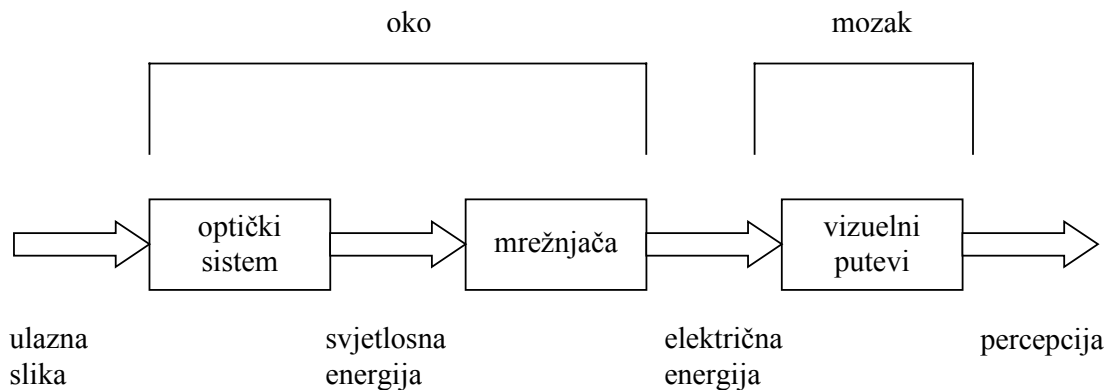
Kontrast predstavlja razliku svjetlina dvije susjedne površine. *Apslutna vrijednost svjetline* nekog objekta je od manjeg značaja od *relativne svjetline (kontrasta)*. Objekti koji imaju istu objektivnu vrijednost svjetline (*luminance*), kao što su unutrašnji kvadrati na Slici 9, mogu izazvati različit subjektivni osjećaj svjetline (*brightness*) zavisno od kontrasta.



Slika 9. Uticaj kontrasta na subjektivni osjećaj svjetline

MODEL LJUDSKOG VIZUELNOG SISTEMA

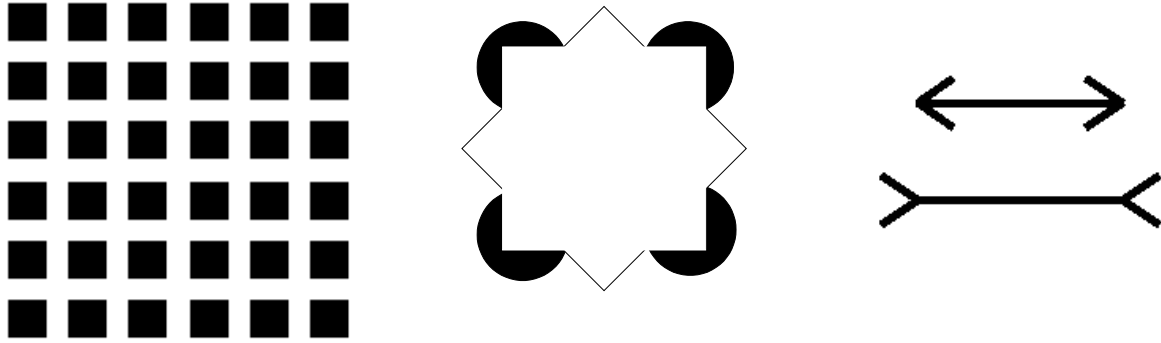
Opis ljudskog vidnog sistema inženjerskim terminima može navesti nekoga da zaključi kako postoji dovoljno znanja o ljudskom vidnom sistemu te da se može izvršiti modeliranje vidnog sistema standardnim tehnikama, Slika 10.



Slika 10. Grubi model ljudskog vidnog sistema

Optičke iluzije

Dva jednostavna primjera optičkih iluzija, prikazana na Slici 11 dokazuju da navedena razmatranja predstavljaju grubo pojednostavljenje i da se ovakav model može koristiti sa ekstremnom pažnjom. Lijeva slika stvara iluziju sivila između kvadrata, tamo gdje ona stvarno ne postoji. Dalje, postoji osjećaj dinamičke promjene u slici, uzrokovan, dijelom, naglim, nesvjesnim pomacima oka. Desna slika stvara iluziju pojačanog kontrasta i nepostojećih kontura, od kojih se ništa ne može objasniti predloženim opisom percepcije (kao vidnog sistema).



Slika 11. Optičke iluzije

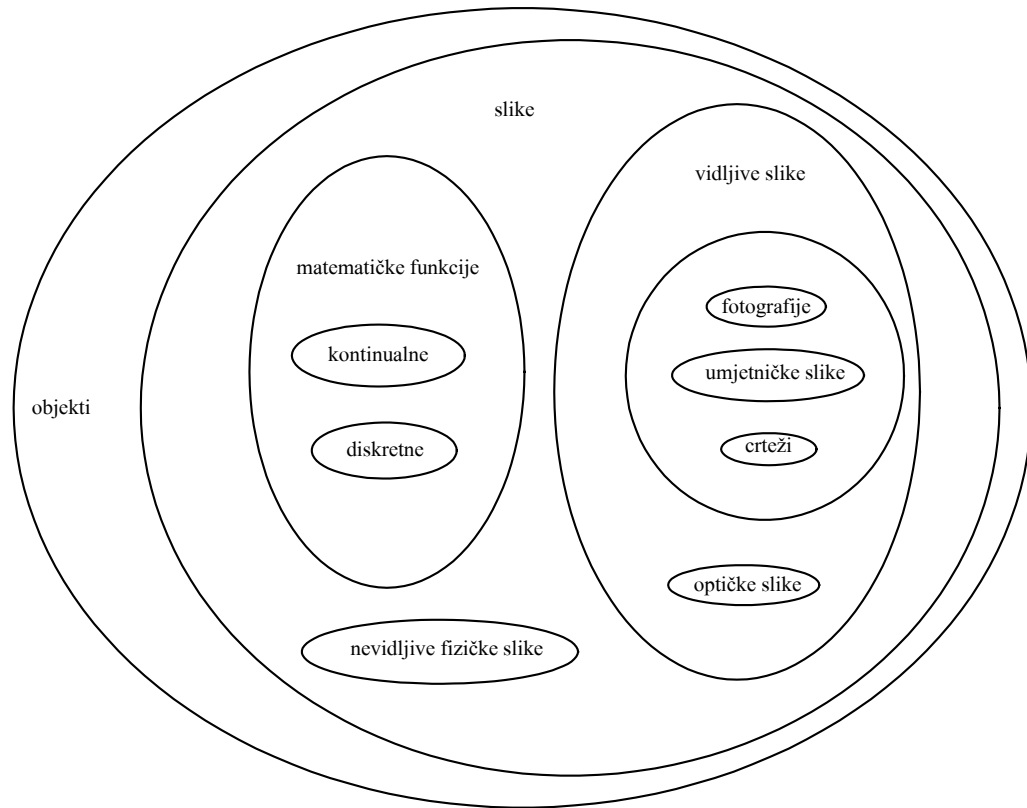
OSNOVNI POJMOVI I DEFINICIJE

Image (slika uopšte) - po Websteru je: “*Predstava ili imitacija objekata ili stvari, ..., grafički opis, ..., nešto uvedeno da prikazuje nešto drugo*”. Dakle, u opštem slučaju, slika je prikaz nečeg drugog. Npr., fotografija neke osobe je samo prikaz te osobe kako je jednom izgledala pred kamerom.

Ako posmatramo skup svih objekata, slike formiraju podskup skupa objekata, Slika 12. Dalje, postoji korespondencija između svake slike i objekta koji ona predstavlja. U skupu slika, veoma važan podskup čine *vidljive slike* - one koje oko može da vidi. Unutar ovog skupa, zavisno od tehnike nastanka slike, razlikujemo dva podskupa. Prvi čine *fotografije, umjetničke slike i crteži*. Drugi podskup čine *optičke slike* formirane pomoću leća, optičkih rešetki i holograma. Sve vidljive slike su fizičke slike jer predstavljaju stvarnu distribuciju materije ili energije. Dok su fotografije, crteži i umjetničke slike distribucija svjetlosti različitih talasnih dužina i intenziteta u ravni, optičke slike su prostorna distribucija svjetlosti različitih talasnih dužina i intenziteta.

Skup *nevidljivih slika* čine *abstraktne matematičke slike* kao što su slike koje prikazuju kontinualne i diskretne funkcije, te *nevidljive fizičke slike*. Primjer nevidljivih fizičkih slika su mape koje prikazuju temperaturu, pritisak, gustinu populacije, itd...

Picture (slika) je uži pojam od pojma *image*. Webster definiše *picture* kao “*predstava načinjena slikanjem crtanjem ili fotografisanjem, ..., jasan, tačan, grafički opis objekta ili stvari koji sugeriše mentalnu zamisao ili daje tačnu ideju o suštini stvari*”. Mi ćemo koristiti riječ *slika* da označimo distribuciju materije koja je vidljiva kad je odgovarajuće osvijetljena. Ipak, kad je riječ o obradi slike, riječ *slika* se često koristi umjesto riječi *slika uopšte*.



Slika 12. [3] Klasifikacija slika

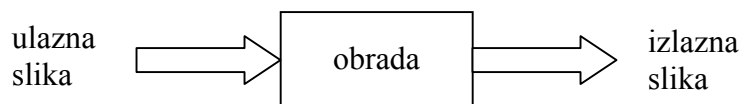
Riječ *digitalno* se odnosi na način računanja numeričkim metodama ili rad diskretnim jedinicama. Ako definišemo *digitalnu sliku* kao numeričku predstavu objekta (koji takođe može biti slika), *pikseli* su diskretne jedinice u prostoru, a kvantovana cjelobrojna vrijednost svjetline čini numeričku komponentu.

Pod *obradom* podrazumijevamo niz operacija koje vode određenom cilju, promjeni forme objekta na željeni način.

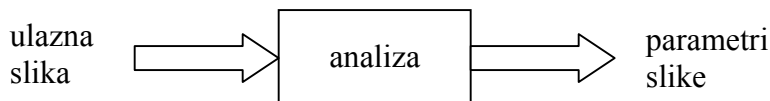
Sada možemo definisati *digitalnu obradu slike* kao podvrgavanje numeričke prezentacije objekta nizu operacija u cilju dobijanja željenog rezultata. Kad je riječ o slici, obrada mijenja njenu formu da bi slika postala atraktivnija, ili da bi se pojednostavila neka druga unapred definisana obrada.

Uobičajeno je da se opšta definicija slike ograniči. Ako se drugačije ne naglasi, *digitalnu sliku* definišemo kao *odmjerenu, kvantovanu funkciju dvije varijable koja je generisana optičkim sredstvima, odmjerena u jednako razmaknutim tačkama i kvantovana jednakim intervalima amplitude*. Prema tome, digitalna slika se predstavlja dvodimenzionalnom matricom kvantovanih vrijednosti.

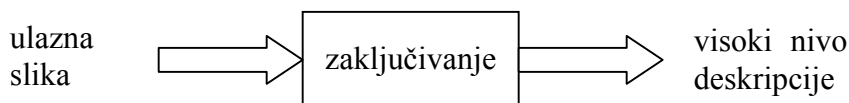
Rezultat digitalne obrade slike je modifikovana verzija same slike. Prema tome, *digitalna obrada slike*, Slika 13, je proces koji prevodi sliku u sliku. *Digitalna analiza slike*, Slika 14, prevodi digitalnu sliku u nešto što nije digitalna slika, npr., skup mjernih podataka ili odluka. Unatoč tome, termin digitalna obrada slike se koristi da prekrije i obradu i analizu. *Razumijevanje slike*, Slika 15, na osnovu ulazne slike generiše visoki nivo deskripcije.



Slika 13. Digitalna obrada slike



Slika 14. Analiza slike



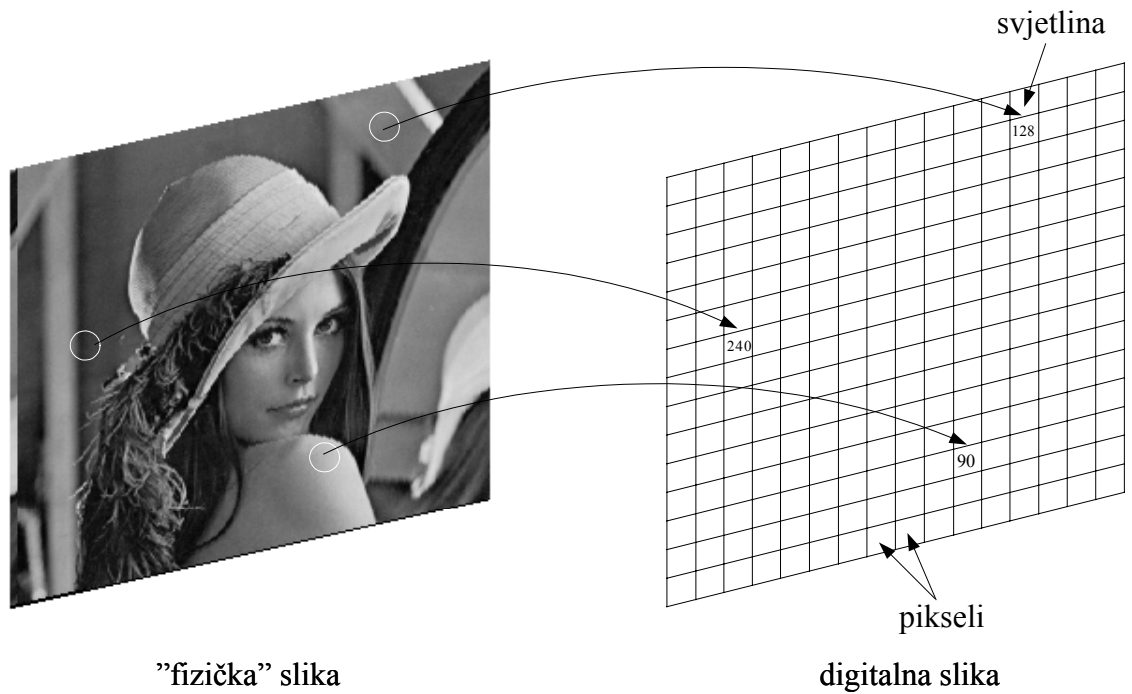
Slika 15. Razumijevanje slike

Može se smatrati da se slika sastoji od pod-slika, ponekad označenih kao *regioni-od-interesa* (ROI), ili, jednostavno, *regioni*. Ovaj koncept je odraz činjenice da slika često sadrži kolekciju objekata od kojih svaki može biti osnova za odgovarajući region. U digitalnoj obradi slike je moguće primjenjivati specifičnu obradu na selektovani region. Prema tome, jedan dio slike se može obrađivati da se smanji zamućenje izazvano pokretom, dok se u drugom dijelu slike cilj obrade može biti bolja interpretacija boja.

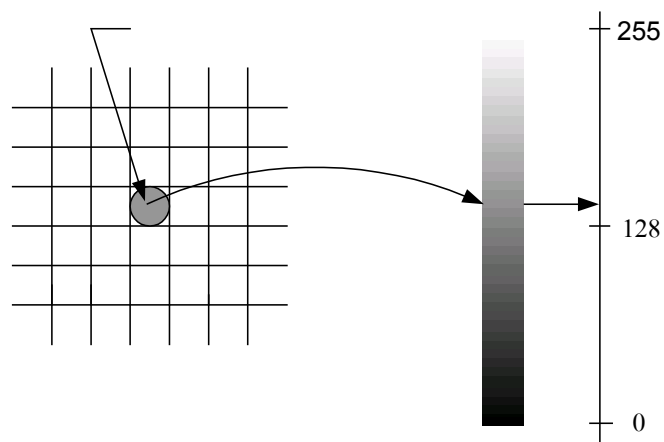
Dalje, ograničićemo razmatranja na 2D obradu slike, mada se većina koncepata i tehnika mogu lako uopštiti na višedimenzionalnu obradu slike.

Dvodimenzionalna slika se može razmatrati kao funkcija dvije realne varijable, npr., $a(x, y)$, gdje je a amplituda (što odgovara svjetlini) slike na poziciji datoj realnim koordinatama (x, y) .

Digitalna slika $a[m, n]$ u 2D diskretnom prostoru se izvodi iz analogne slike $a(x, y)$ iz 2D kontinualnog prostora procesom odmjeravanja koji se često naziva *digitalizacija*. Kontinualna 2D slika se podijeli u M vrsta i N kolona, Slika 16. Presjek vrste i kolone je označen kao *piksel*. Pridružena vrijednost $a[m, n]$ u cjelobrojnim kordinatama $[m, n]$ $\{m = 0, 1, 2, \dots, M - 1\}$ i $\{n = 0, 1, 2, \dots, N - 1\}$ odgovara nivou svjetline, Slika 17. U većini slučajeva kontinualna slika je funkcija više varijabli, uključujući dubinu (perspektivu), boju i vrijeme. Mi ćemo u ovom kursu obrađivati samo 2D statičke slike.



Slika 16. Digitalizacija slike - korespondencija između fizičke i digitalne slike



Slika 17. Digitalizacija slike – pridruživanje vrijednosti svjetline

Riječ *skeniranje* (*scanning*) koristimo da označimo selektivno adresiranje specifičnih lokacija unutar slike. Svaki od malih podregiona slike u procesu skeniranja se naziva element slike ili *piksel* (*pixel*). Pravougaona matrica za skeniranje je poznata pod imenom *raster*. U slučaju trodimenzionalnih slika svaki od malih podregiona slike u prostoru se naziva *voksel* (*voxel*). *Gustina odmjerenja* (*sampling density*) digitalne slike je broj

odmjerenih tačaka po jedinici mjere (npr., piksela po milimetru) u domenu slike. Recipročna vrijednost gustine odmjeravanja je *razmak piksela*.

Odmjeravanje (sampling) označava mjerenje svjetline na mjestu svakog piksela. Odmjeravanje se obično izvodi sa uređajima koji su osjetljivi na svjetlost i koji proizvode napon proporcionalan intenzitetu svjetlosti u svakom pikselu slike.

Kvantizacija (quantization) je metod predstavljanja izmjerenih vrijednosti cijelim brojevima. Senzori slike su uobičajeno praćeni analogno/digitalnim konvertorima koji generišu broj proporcionalan naponu.

Rezolucija u nivou sivila (gray scale resolution) je broj nivoa svjetline po jedinici mjere amplitude slike (jačine osvjetljenosti slike). Smještajući digitalnu sliku sa 8-bitnim bajtovima, npr., vodi skali od 256 nivoa svjetline.

Slika 18 ilustruje efekat korištenja različitog broja nivoa sivila (256, 64 i 16) za zapis svjetline sivih slika, dok je na Slici 19 prikazan proces digitalizacije na primjeru slike "Lena" sa 256 nivoa sivila.



Slika 18. Efekat korištenja različitog broja nivoa sivila. S lijeva na desno: digitalizacija slike "Lena" sa 256, 64 i 16 nivoa sivila



a) "kontinualna" slika



b) raster



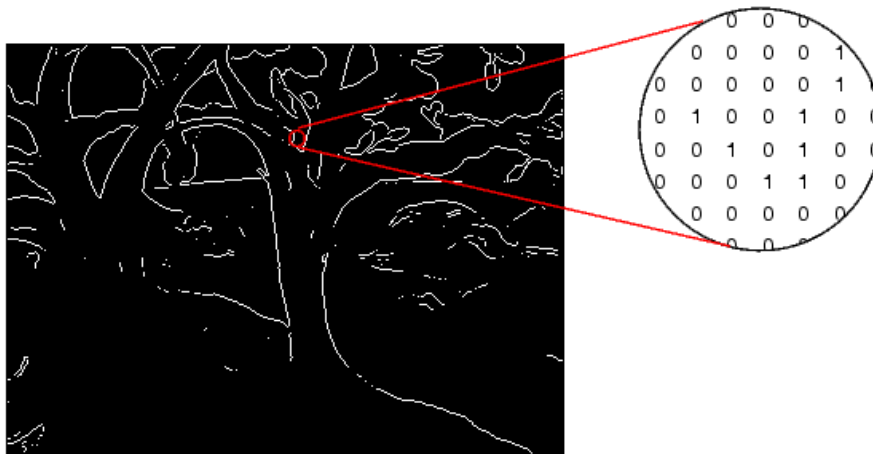
c) slika usrednjena po pikselima

90	135	165	151	166	140	132	147
133	151	164	166	101	103	129	154
168	155	158	99	99	88	55	91
185	144	41	27	26	49	46	90
168	73	30	57	56	183	74	77
91	102	96	86	114	143	116	86
96	119	126	122	123	134	126	98
95	119	140	151	151	149	126	106

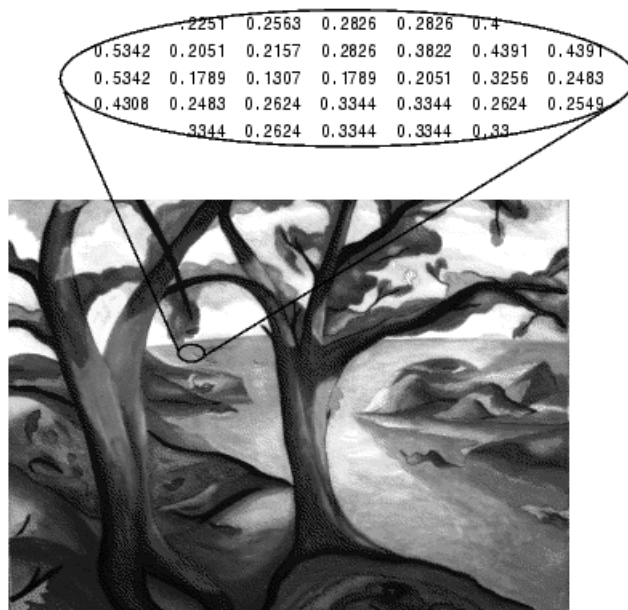
d) matrica svjetlina koje odgovaraju dijelu digitalne slike

Slika 19. Proces digitalizacije slike "Lena" sa 256 nivoa sivila

Jedna od klasifikacija dijeli digitalne slike na *binarne*, *sive (gray-scale)* i *multispektralne* slike. Kod binarnih slika vrijednost svjetline u svakoj tački (pikselu) se kvantuje sa “0” (crno) ili “1” (bijelo), Slika 20. Sive slike imaju više nivoa sivila, što znači da je svjetlini u svakoj tački pridružena jedna brojevana vrijednost iz konačnog skupa. Često se koristi opseg vrijednosti 0-255, gdje je 0-crno, a 255-bijelo, ili 0-1, kao na Slici 21, gdje je 0-crno a 1-bijelo. Uobičajeno se ove slike nazivaju crno-bijele slike (kao kod crno-bijele fotografije ili crno-bijele televizijske slike). Mi ćemo zadržati naziv sive slike da bi ih razlikovali od binarnih slika.



Slika 20. [11] Predstavljanje binarnih slika



Slika 21. [11] Predstavljanje sivih (crno-bijelih) slika

Multispektralne slike čine podskup fizičkih slika koje imaju više od jedne lokalne osobine definisane u svakoj tački. Primjer su tri-spektralne, crveno-zeleno-plave (red-green-blue) slike koje se uobičajeno koriste kod fotografije i televizije u boji. Dok binarne i sive slike imaju samo jednu vrijednost za svjetlinu u svakoj tački, slike u boji imaju tri vrijednosti svjetline, po jednu za crvenu, zelenu i plavu, Slika 22. Ove tri vrijednosti predstavljaju intenzitet svjetlosti u različitim spektralnim opsezima koje oko vidi kao različite boje.

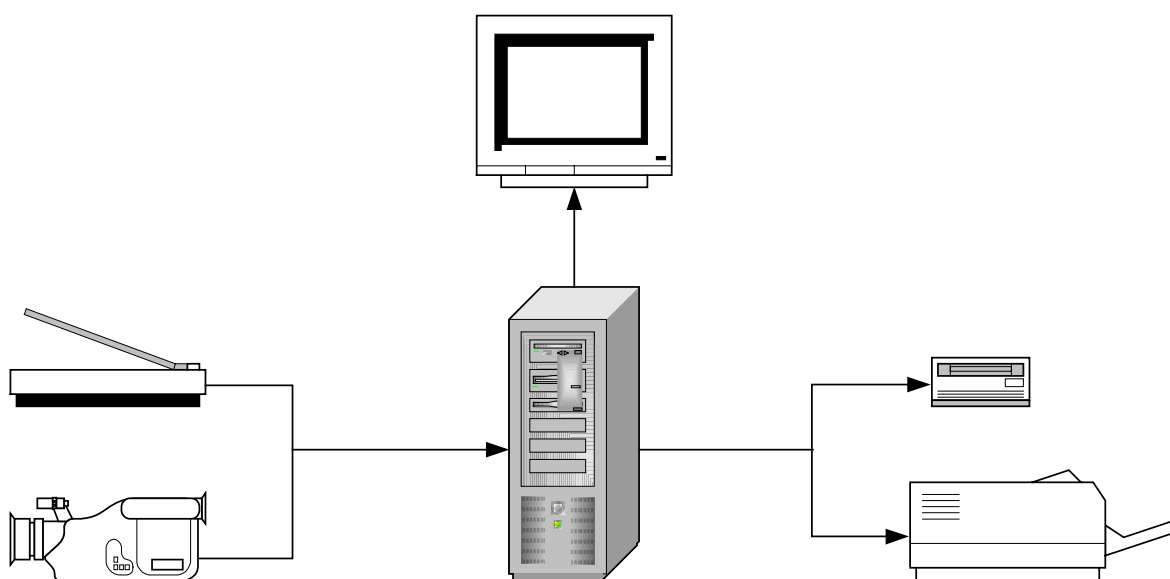


Slika 22. [11] Predstavljanje slika u boji

SISTEMI ZA DIGITALNU OBRADU SLIKE

Digitalna obrada slike izuzetno je složen i numerički zahtijevan zadatak. Za off-line obradu mogu se upotrebljavati računari opšte namjene, dok se za rad u realnom vremenu koriste specijalizovani sklopovi sa digitalnim signal procesorima, multiprocesorski i distribuirani sistemi i druge specijalizovane arhitekture za obradu slike.

Na Slici 23 je prikazana opšta arhitektura za digitalnu obradu slike sa računarom opšte namjene.



Slika 23. Sistem za digitalnu obradu slike sa računarom opšte namjene

OSNOVNE OBLASTI DIGITALNE OBRADU SLIKE

Osnovne oblasti na koje se može podijeliti digitalna obrada slike su sljedeće:

- Reprezentacija i modeliranje slike (representation and modeling),
- Pобољшanje kvaliteta slike (image enhancement),
- Restauracija slike (image restoration),
- Analiza slike (image analysis),
- Rekonstrukcija slike iz projekcija (image reconstruction from projections),
- Kompresija slike (image compression).

Oblast reprezentacije slike podrazumijeva korištenje ortogonalnih funkcija dvije varijable za zapis slike, kao i opis slike u nekom od transformacionih domena (Furijeov i dr.). U ovu oblast takođe spada rad sa linearnim (FIR, IIR) kao i nelinearnim sistemima za obradu slike.

Poboljšanje kvaliteta slike obuhvata poboljšanje kontrasta i rubova na slici, pseudokoloriranje (pseudocoloring) uklanjanje šuma, izoštravanje slike i slično.

Pod restauracijom, odnosno obnavljanjem slike podrazumijevamo pronalaženje ocjene (estimata) originalne slike iz zamućene i zašumnjene slike. Pri tome se vrši uklanjanje ili smanjivanje degradacija unesenih od strane senzora ili okoline, zamućenosti (loš fokus), geometrijskih izobličenja ili nelinearnosti, kao i raznih smetnji. Analiza slike vrši mjerenje (ekstrakciju) informacije iz slike sa svrhom dobivanja opisa slike. Primjeri analize slike su: klasifikacija objekata sa proizvodne linije, mjerenje veličine i orijentacije krvnih zrnaca, upravljanje robotima, upravljanje avionom na osnovu slika prikupljenih tokom leta i sl. Rekonstrukcija slike iz projekcija se bavi posebnom klasom problema rekonstrukcije 2D ili 3D objekata iz nekoliko 1D projekcija. Svaka 1D projekcija se dobija na osnovu paralelnih rentgenskih zraka koje prolaze kroz objekt. Upotreba je veoma široka: medicina (CT, MR), astronomija, radari, geologija, nedestruktivno testiranje objekata, itd... Budući da su slike memorijski veoma zahtjevne, tehnike kompresije pokušavaju smanjiti broj bitova potrebnih za spremanje slike bez ili sa gubitkom informacije. Primjene su mnogostruke: arhiviranje slika i dokumenata, prenos slike, multimedia, itd...

Osim navedenih, kao posebne oblasti koje se ne mogu direktno svrstati u digitalnu obradu slike, ali su s njom usko vezane, izdvajaju se računarska grafika i computer vision.

Računarska grafika (computer graphics) predstavlja obradu i prikaz slika stvari koje postoje samo kao zamisli ili kao matematički opis, a ne kao stvarni objekti. Računarska grafika uključuje i "*computer art*", korištenje sistema za digitalnu obradu slike kao medija za umjetnički izraz.

Computer vision (vizuelna inspekcija pomoću računara) se bavi razvojem sistema koji su u mogućnosti da interpretiraju sadržaj prirodnih scena. U polju robotike, computer vision se koristi za realizaciju očiju robota.