

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Основне академске студије

Модул: Информатика у инжењерству

Предмет: Архитектура рачунарских система

Број индекса: 84/2016

Инес Н. Чемерикић

Основни концепти дигиталне обраде слика

Завршни рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. Др Јасна Радуловић проф. – ментор
2. _____
3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог завршног рада кандидат треба да

Опише и анализира:

- Концепт дигиталне обраде дводимензионалних слика,
- Дискретизацију и дигитализацију,
- Основне обраде у просторном и фреквентном домену,
- Методе побољшања квалитета слике.

Препоручена литература:

- [1] Поповић М.: Дигитална обрада слике, Електротехнички факултет у Београду, 2006.
- [2] Roger L. Easton, Jr.: Fundamentals of Digital Image Processing, Rochester Institute of Technology, 2010.

Крагујевац, 24. 02. 2020. год.

Ментор:

Др Јасна Радуловић, ред. проф.

Резиме:

У раду су описане основе дигиталне обраде слике, односно методе обраде и представљање дигиталне слике. Анализиране су методе дигитализације монохромне и колор слике, објашњени су основни концепти релевантни за појам дигиталне слике, као и субјективне и објективне мере за оцену квалитета слике. На крају рада представљене су основне методе за побољшање квалитета слике и дата закључна разматрања.

Кључне речи: *Дигитална обрада; Дигитализација слике; Побољшање квалитета.*

Summary:

This paper describes the basics of digital image processing, that is, methods of processing and presentation of digital image. Methods of digitization of monochrome and color images are analyzed, the basics of digital images are given, as well as subjective and objective measures for image quality assessment. At the end of the paper, basic methods for improving image quality are presented and concluding considerations are given.

Key words: *Digital processing; Digitization of images; Quality improvement.*

Садржај:

Резиме:	2
1. Увод	4
2. Основе дигиталне обраде слике	5
2.1. Методи дигиталне обраде слике	5
2.2. Представљање и обрада слике	9
3. Карактеристике светлости и визуелног система	11
3.1. Светлост и њене физичке карактеристике	11
3.2. Визуелни система и његове карактеристике	14
3.3. Колор систем у преносу дигиталне слике	20
4. Дигитализација слике	33
4.1. Дигитализација монохромне слике	33
4.2. Дигитализација колор слике	35
4.3. Основне карактеристике дигиталне слике	36
4.4. Субјективне и објективне мере за оцену квалитета слике	38
5. Основе побољшања квалитета слике	40
5.1. Локалне операције побољшања квалитета слике над појединачним пикселима	40
5.2. Просторне операције над групом пиксела	45
5.3. Трансформационе технике	54
6. Закључак	56
Литература:	57

1. Увод

Дигитална обрада слике појавила се средином 60-их година XX века у циљу унапређења истраживања свемира. Имајући у виду тадашње могућности електронике и рачунара, обрада слике обухватала је само неке основне операције. Ипак тадашња обрада омогућавала је поправку квалитета слике добијене преко свемирских сонди и тзв. вештачких сателита.

Каснији развој дигиталне обраде и побољшања квалитета слике могу се поделити у три фазе. Прва фаза обухвата развој дигиталне обраде слике из средине 60-их година до средине 80-их година XX века [1]. Прву фазу карактерише примена од стране војске и у истраживању свемира. Тадашња технологија за обраду слика била је габаритна и изузетно скупа. Такође, била је распоређена у малом броју истраживачких центара, углавном у развијеним земљама које су имале ту могућност да сарађују са војском и научним институцијама за истраживање свемира.

Развојем микроелектронике и појавом микропроцесорских компонената дошло је до наглог пада цене рачунарске опреме и пораста њених могућности. Опрема за дигиталну обраду слике постаје периферија персоналних рачунара који су се у међувремену појавили и ово се сматра другом фазом развоја. То је омогућило да се дигитална обрада слике користи и у разним комерцијалним применама, као што су на пример: индустрија, роботика, телевизија, телекомуникације и др.

Трећа фаза дигиталне обраде слике почиње са појавом првих дигиталних фотоапарата. Карактеришу је веома разноврсне примене, које су често приступачне обичном кориснику без много искуства у обради слике. Како се повећава моћ персоналних (PC) рачунара, дигитална обрада слике постаје остварива и у кућним условима. Данас постоји велики број специјализованих програма за обраду слике и ова фаза је у току.

Дигитална обрада слике представља једну интердисциплинарну област, а обухвата делове рачунарства, електронике, физике, телекомуникација, вештачке интелигенције и др. Према данашњим схватањима дигиталне обраде, рачунарска обрада дигиталних слика се може поделити на три нивоа. Најнижи ниво представљају једноставне операције којима се отклања шум из слике, поправља контраст и изоштрава слика. Средњи ниво представља одређивање границе региона, поделе слике на објекте, опис објеката на начин повољан за даљу обраду и класификацију. Средњи ниво обраде има слику као улазни сигнал, док су излазни подаци атрибути издвојени из улазне слике. Највиши ниво представља операције разумевања скупа издвојених објеката. Ове операције подражавају визуелни део когнитивног система човека. Према савременим схватањима дигитална обрада слике обухвата све операције најнижег и већи део средњег нивоа [1].

2. Основе дигиталне обраде слике

Дефиниција дигиталне обраде слике у свом најједноставнијем облику може гласити да је то скуп метода за обраду слике помоћу рачунара, а у ширем смислу то је обрада свих дводимензионалних сигнала – података. Исход дигиталне обраде слике су најчешће нова слика која се приказује на монитору, а може бити приказана и као фотографија или филм. Данас је увођењем елементарних техника обраде слика, пренос обраде и преноса слике слике знатно скраћен, а сама слика је квалитетнија.

2.1. Методи дигиталне обраде слике

Улазни и излазни сигнали савремених система за обраду слике су веома различити, као и њихова употреба. Већина алгоритама за обраду слике су исти или слични, без обзира што се користе у различитим областима. Методе које се користе у области дигиталне обраде слике могу се поделити на:

- методи за репрезентацију,
- методи за побољшање слике,
- методи за рестаруацију слике,
- методи за компресију слике,
- методи за анализу слике и
- методи за реконструкцију слике и пројекција.

Репрезентација и моделовање слике представља карактеризацију величине коју чини један елемент слике. У зависности од порекла слике, може се представити осветљеност објекта на сцени, нпр. ако је коришћена камера која је осетљива на видљиви део спектра. Такође, може представити, приликом ренгентских снимака, апсорционе карактеристике ткива, а код инфра црвених камера мерење температуре објекта на сцени, односно код ултразвучних снимака рефлексионе карактеристике ткива и др.

Један од већих проблема репрезентације слике јесте верност којом се приказује одређена физичка појава. Верност приказане слике највише зависи од сензора који се користе у камери, односно његовог квалитета. Такође, верност репрезентације слике зависи и од просторне и амплитудске дискретизације, тј. од одабирања и А/Д конверзије. Репрезентацију слике обухватају и разни поступци трансформације слике, који се користе за поправку квалитета слике, бољег описа садржаја слике, компресију слике и слично.

Проблеми репрезентације слике повезани су са поступцима моделовања слике. Слика се углавном моделује статистички, помоћу статистичких карактеристика првог и другог реда. У том случају се најчешће користи претпоставка о стационарности слике. Знатно виши ниво моделовања користи се код анализе слике, јер се сматра да је слика сачињена из више

објеката, моделовањем се дефинишу везе објеката на слици. Јединствен проблем чине представљање и моделовање делова слика, где се као променљива величина узима време, односно ради се о функцији у тродимензионалном (3D) простору.

Метода побољшања слике је метода која се користи за промену неких карактеристика слике, како би она била прикладна за приказивање на монитору или за њену даљу анализу. У суштини се поправљањем слике не поправља њен информациони садржај, већ се олакшава употреба постојећих информација.

Постоје бројни методи за побољшање слике које искључиво зависе од услова у којима је слика добијена, односно примене побољшања слике. Углавном се примењују међузависни или адаптивни поступци побољшавања слике. Методи који се најчешће користе за побољшање слике су:

- побољшање контраста,
- елиминација шума,
- изоштравање слике,
- бојење слике и др.

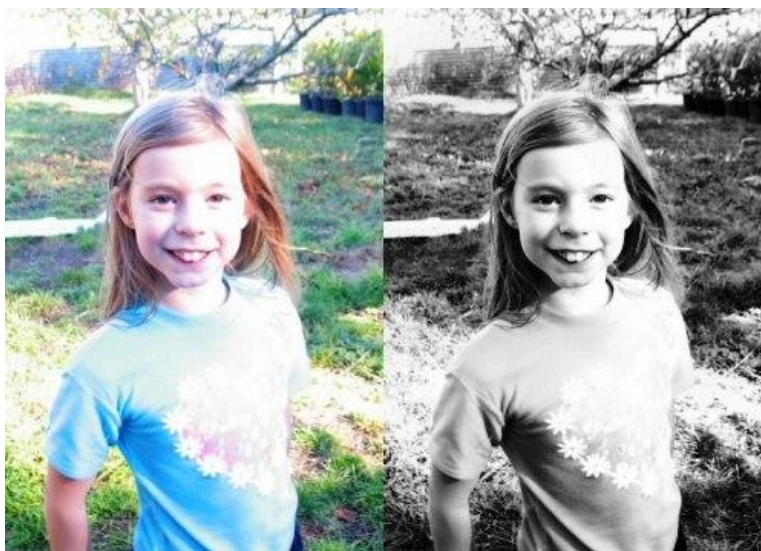
Код појединих метода сваки пиксел слике се третира независно, док се код неких других пиксели третирају зависно од своје околине. За методе побољшања слике карактеристично је да су углавном једноставне, па се могу извршити у реалном времену [1].

Рестаурација слике се примењује како би се побољшао квалитет слике у случајевима када је деградација слике позната, односно када се може формирати степен деградације. Пример рестаурације слике је корекција геометријских изобличења оптичког дела камере [1]. Ту су још и уклањање шума слике за познат статички модел, корекција услед смањене оштрине слике услед кретања или дефокусирања камере и др. У односу на остале поменуте методе рестаурација слике је доста сложенији метод и обично је није могуће извршити у реалном времену.

Компресија слике је значајна по томе што се њоме постиже смањење, иначе, великог броја података који слика садржи. Нпр. једна филмска слика стандардних димензија (24 mm x 36 mm) има око 10^7 елемената, ако је резолуција филма 0,01 mm. Док једна стандардна дигитална слика резолуције 512 x 512 пиксела има око 256 000 елемената. Ако се сваки пиксел представи са 8 bita за представљање такве слике потребно је 256 kB. Већа количина података присутна је код секвенци слика, тако једна TV секвенца стандардног квалитета захтева око 10 MB/s [1].

На примеру PNG (*Portable Network Graphics* – преносива мрежна графика) формата слике приказан је начин компресије. PNG формат је дизајниран као својеврсна замена за GIF

(Graphic Interchange Format) формат. У сврху коришћења на Web-у, PNG има три главне предности над GIF-ом: „alpha kanale“ (променљива прозирност), gamma корекција, те вертикално и хоризонтално компримовање. За разлику од GIF формата PNG не подржава вишеструке слике (GIF анимације). PNG формат у односу на JPEG формат постиже знатно већу „тежину“ датотеке. PNG формат је данас, још увек врста записа некомпатибилна са многим Web претраживачима, па се ретко примењује у пракси [2]. На слици 2.1, приказан је пример PNG компресије.



Слика 2.1. Пример PNG компресије [2]

Како би пренос слике био технички могућ и рентабилан, неопходна је примена неких од метода компресије слике, којима се смањује број бита потребан за приказивање слике. С обзиром на велику потребу за компресијом слике развијен је велики број метода компресије. Неке од метода омогућавају репродуковање броја бита слике за репрезентацију без губитка информација, док друге методе омогућавају компресију слике уз безначајан губитак количине информација и њима се добија знатно већи степен компресије. За компресију података код секвенци слика развијен је велики број метода, а које као резултат имају велики степен компресије. На овај начин омогућен је пренос и складиштење дигиталног видео сигнала.

Применом једноставног алгоритма, оригинална слика се може задржати у стању где је губитак квалитета видљив, али не још у толикој мери, односно губици информација износе 5.6% [3]. Треба напоменути да је код коришћеног алгоритма граница за скраћивање коефицијената једнака за сваки ниво. Што значи да би прво побољшање алгоритма могла бити промена граница алгоритма за скраћивање коефицијената за сваки ниво.

Програмски алати који се користе за компресију слике, попут *Matlab*-а нуде и неколико начина мерења успешности сажимања слике. CR – *Compression ratio*, говори о томе који проценат информација користимо. M.S.E. – *Mean Squared Error* даје податке о томе колика је разлика између оригинала и компресоване слике (што је M.S.E. мањи, то је компресована слика боља). M.S.E. се најчешће приказује изразом [3]:

$$MSE = \frac{1}{mn} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (X - X_c)^2 \quad (2.1)$$

где су:

m, n – цели бројеви,

X – стварна излазна вредност и

X_c – предвиђена излазна вредност.

BPP – *Bit-Per-Pixel* означава број бита потребних за похрану једног пиксела слике, док PSNR – *The Peak Signal to Noise Ratio*, мери највећу грешку у децибелима и дат је изразом [3]:

$$PSNR = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{255^2}{MSE} \right) \quad (2.2)$$

Што је PSNR већи, то је бољи квалитет компресоване слике. Ако је PSNR изнад 40 dB може се рећи се да се компресована слика не разликује од оригиналне, а најчешће је довољно око 30 dB да би се постигао задовољавајући квалитет [3].

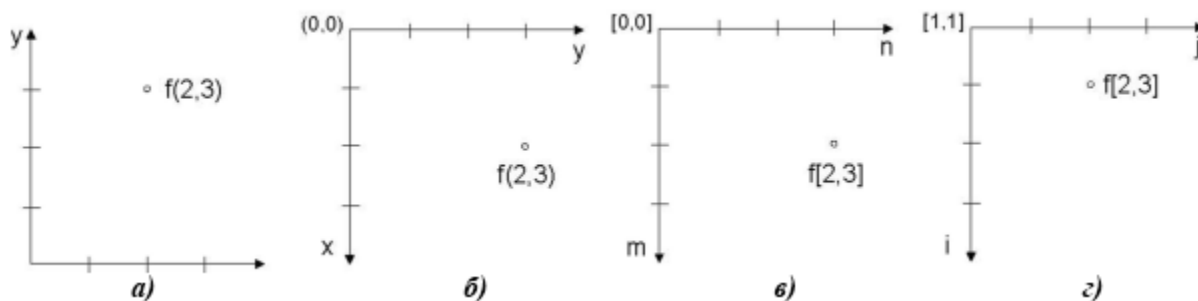
Анализа слике се примењује како би се утврдиле квантитативне карактеристике објеката на слици и њихов међусобни однос [1]. Анализа слике своју примену налази код производних линија, нпр у надзору аутоматских производних система, затим у биомедицини и другим сличним областима. Такође, своју примену налази и у роботичи и то су сложенији примери, који се користе за препознавање облика, а често се називају машински или вештачки вид. Анализу слике чини више поступака, а циљ им је да опонашају процес перцепције опажања код човека. У ову групу анализе слике спадају процеси као што су поступци сегментације, поступци за идентификацију објеката, издвајање ивица и друго.

Реконструкција слике из пројекција представља јединствену групу метода којима се врши рестаурација слике, односно реконструкција дводимензионалних или вишедимензионалних објеката из више једнодимензионалних или дводимензионалних (2D) пројекција. Реконструкција слике је своју примену највише нашла код медицинских

уређаја, као што су скенери, као и код неструктивних (без разарања) испитивања материјала, астрономији и другим сродним областима.

2.2. Представљање и обрада слике

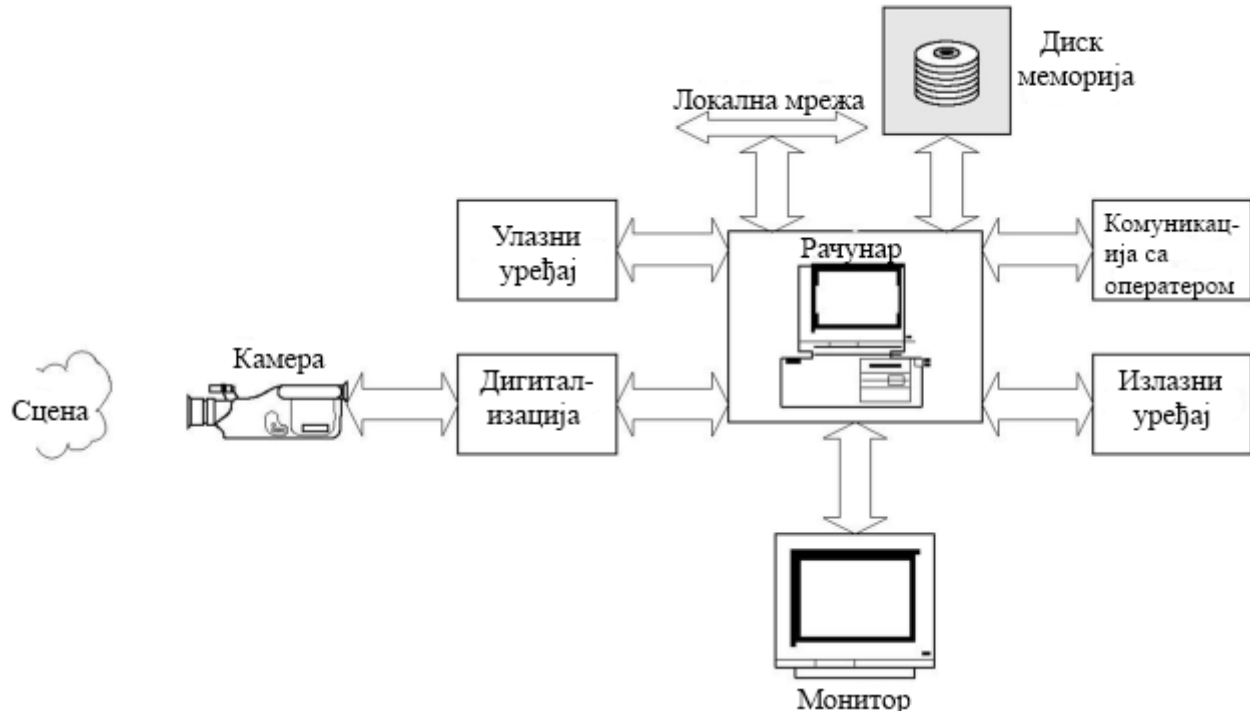
Слика се углавном представља преко координатног система. Уместо преко Декартовог координатног система, слика 2.2а, слика се углавном приказује преко координатног система на слици 2.2б, који се иначе користи у телевизијском приказивању слике. Разлика између ова два координатна система је у координатном почетку, који се налази у горњем левом углу, док су координатне осе замениле своје улоге. Поред наведеног и x – оса је окренута на доле.



Слика 2.2. Правоугли координатни системи: а) Декартов систем, б) систем за репрезентацију континуалне слике, в) систем за репрезентацију дигиталне слике, г) матрични систем [1]

За репрезентацију дигиталне слике користи се координатни систем са слике 2.2в. Координате пиксела дигиталне слике су цели бројеви m и n , док координатни почетак одговара тачки $(0,0)$. Када је реч о матричном координатном систему он одговара матричној нотацији, где прва координата i означава врсту, а друга координата j колону матрице, слика 2.2г. Матрични координатни систем се од координатног система за дигиталну слику разликује по томе што његовом координатном почетку одговара тачка $(1,1)$.

Склоп система за дигиталну обраду слике у великој мери зависи од његове намене, а његове компоненте углавном одговарају начину повезивања приказаном на слици 2.3. Главну компоненту система чини рачунар који је најодговорнији за обраду слике. Сам рачунар је повезан са осталим компонентама, а најважније су: камера са уређајем за дигитализацију, монитор, меморија, улазни и излазни уређаји, рачунарска мрежа, интернет и уређаји који омогућавају комуникацију са оператером.



Слика 2.3. Елементи система за дигиталну обраду слике [1]

Савремене камере поседују уређај за дигитализацију и представљају основни уређај за пренос дигиталних слика у рачунар. Данас су у примени углавном камере са А/Д конвертотом које као излаз емитују дигитални сигнал. Такође, у примени су још увек и камере са аналогним излазом које је су компатибилане са неким од TV стандарда, док се за дигитализацију слике користи посебан уређај.

Сви остали уређаји, углавном, служе за алтернативне начине уношења слике у рачунар. У те уређаје спадају скенери, нестандартне камере, конвертори филмске слике у TV слику, сензори и остало. Данас се слика у рачунар углавном уноси у дигиталном облику помоћу изменљивих меморијских медијума (меморијских картица и слично), као и преко интернета и локалне рачунарске мреже.

Излазни уређаји, који су данас у примени, могу бити веома различити и сложени, а најважнији од тих уређаја су они за израду слике. То су углавном ласерски штампачи, стандардни штампачи са мастилом, уређаји за израду фотографија, уређаји за израду слајдова, дигитални видео уређаји, уређаји за снимање на оптички диск и остало. Уређаји који се корист за комуникацију рачунара са корисником су монитор, тастатура и миш, док се ређе користе други уређаји.

3. Карактеристике светлости и визуелног система

Код већине система за обраду слике циљ је да се обрађена слика визуелно прикаже посматрачу. Према томе неопходно је познавање основних процеса перцепције визуелних информација. На основу ових процеса могуће је развити методе за субјективну оцену квалитета слике, као и процену сврсисходности примењених алгоритама.

3.1. Светлост и њене физичке карактеристике

Светлост представља део спектра електромагнетног зрачења из опсега таласних дужина који су видљиви голим оком. Видљива светлост се обично дефинише као радијација између ултраљубичасте (са кратким таласним дужинама) и инфрацрвене (са дугачким таласним дужинама). Појава светлости представља електромагнетно зрачење, чија се таласна дужина креће у опсегу $350 \text{ nm} \leq \lambda \leq 750 \text{ nm}$, а која побуђује визуелни систем човека, слика 3.1.



Слика 3.1. Подручје видљиве светлости [4]

Примарни извор светлости је Сунце, а могу бити и вештачко светло и др. Секундарни извор светлости рефлектују или чине дифузионом светлост коју емитују поједини примарни извори.

Спектрална густина енергије која се емитује са неког осветљеног објекта $f(\lambda)$ може се приказати изразом [1]:

$$f(x, y, \lambda) = \rho(x, y, \lambda)I(\lambda) \quad (3.1)$$

где је:

- $\rho(\lambda)$ – рефлексиивност објекта (ако је објекат непрозиран) или трансмисиивност објекта (ако је објекат прозиран),

- $f(\lambda)$ – спектрална густина енергије примарног извора светлости која осветљава објекат,
- $f(\lambda)$ – густина флуksа зрачења [W/m^3].

Када се врши интеграљење густине флуksа по λ , тада се добија нова физичка величина, која се назива ирадијанса или озраченост [W/m^2] [1]:

$$e_r(x, y) = \int_0^\infty \rho(x, y, \lambda) d(\lambda) \quad (3.2)$$

Интеграљењем иридијансе на некој коначној површини добија се физичка величина која се назива флуks зрачења [W] [1]:

$$P = \iint_{x,y} e_r(x, y) dx dy \quad (3.3)$$

Све претходно изведене физичке величине не узимају у обзир карактеристике посматрача. Ове величине називају се и радиометријске величине. На врло једноставном примеру могу се илустровати проблеми који настају. Поједине густине флуksа зрачења два светлосна извора могу да буду једнаке, односно $f(\lambda_1) = f(\lambda_2)$, где је $\lambda_1 = \lambda_2$. Када једна таласна дужина лежи у видљивом делу спектра, односно друга не, јасно је да ће визуелни утисак два извора зрачења бити различит. Из тог разлога се при мерењима примењују фотометријске величине које узимају у обзир и карактеристике посматрача.

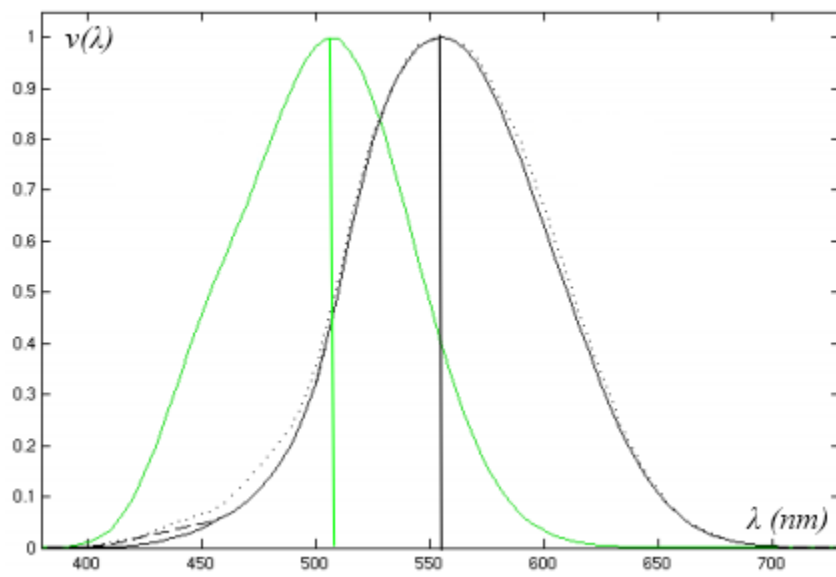
Када се у изразу (3.2) укључи и спектрална осетљивост посматрача добија се величина која се назива осветљеност неке површине у простору и изражава се јединицом која се назива лукс (lx) [1]:

$$l(x, y) = k \int_0^\infty f(x, y, \lambda) v(\lambda) d\lambda \quad (3.4)$$

где је:

- k – константа,
- $v(\lambda)$ – релативна функција светлосне осетљивости визуелног система човека (слика 3.2).

Крива са слике 3.2, има пик у области жуто зелене боје на таласној дужини $\lambda_r = 555 \text{ nm}$ [1]. Добијена је усредњавањем података за већи број посматрача и дефинисана је прописима међународног комитета за осветљење (CIE – *Commission Internationale de l'Eclairage / International Commission on Illumination*).



Слика 3.2. Релативна функција светлосне осетљивости [4]

На слици 3.2, приказана је релативна осетљивост ока у зависности од таласне дужине. Крива (зелена) односи се на осетљивост ока адаптираног на светлост (дневни услови). Крива (црна) односи се на осетљивост ока адаптираног на таму (ноћни услови) [4].

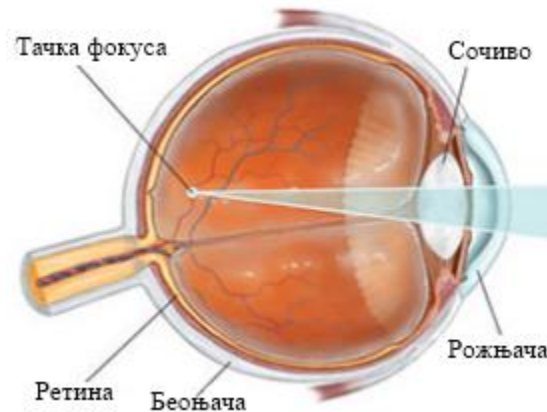
Интеграљењем осветљености на некој коначној површини добија се величина која се назива светлосни флуks или луминанса, а изражава се јединицом која се назива лумен [lm]:

$$\Phi = \iint_{x,y} l(x,y) dx dy \quad (3.5)$$

Јасно је да је $1 \text{ lx} = 1 \text{ lm/m}^2$. Међународним прописима је утврђено да монохроматска светлост (светлост тачно одређене фреквенције и таласне дужине, представљена само у једној боји) таласне дужине $\lambda_r = 555 \text{ nm}$, за коју је $v(\lambda) = 1$, чија је ирадијанса 1 W/m^2 , производи 685 lx . Упоредивањем једначина (3.2) и (3.4) може се утврдити да је вредност константе k у једначини (3.4) $k = 685 \text{ lm/W}$ [1].

Људско око се састоји од заштитних и помоћних делова, оптичког дела и фоторецептора. Заштитне делове ока чине очни капци, обрве, трепавице, вежњача, сузне жлезде и очни мишићи. Делови ока битни за формирање слике објекта називају се „оптички“ делови ока чине, а то су рожњача, течност предње коморе, сочиво и стакласто тело које се налази у задњој очној комори. На слици 3.3, приказана је структура ока. Око се састоји од тзв. јабучице коју чине беоњача, судовњача и мрежњача. Светлост продире у око кроз рожњачу која је провидна и прелама се проласком кроз сочиво. На тај начин се формира слика објекта на мрежњачи, која се налази на задњем делу ока. Количина светлости

регулише се променом пречника малог отвора на дужици, а чији пречник варира од 2 mm до 8 mm, а која се назива зеница [1]. Прилагођавање ока даљини врши се променом облика жижне даљине очног сочива која се креће од 14 mm до 17 mm. Промене ширине зенице и промене облика сочива врше се ширењем и скупљањем цилијарних мишића [1] .

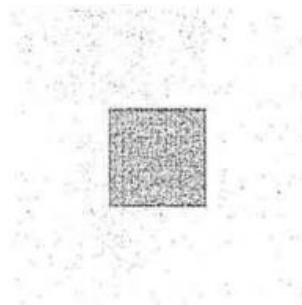


Слика 3.3. Структура човековог ока [5]

3.2. Визуелни система и његове карактеристике

Како дигитална слика представља скуп тачака различите осветљености, веома је значајно познавање особина визуелног система, а које утичу на способност препознавања различитих интензитета осветљености. Према изразу (3.5) следи да је луминанса неког објекта независна од луминанси суседних објеката. Из тога је произишао назив сјајност, који представља субјективни осећај луминансе. Веза између ова два феномена може се експериментално установити.

Ако посматрамо слику 3.4, где су приказана два квадрата различитих, а униформних осветљености, тј. систем објекат-позадина, разлика осветљености се смањује и у неком тренутку наш визуелни систем неће регистровати промену. Мера осетљивости визуелног система јесте најмања разлика осветљености на коју визуелни систем реагује у најмање 75% случајева [1]. Овај феномен детаљније је описан Weber-овим законом.



Слика 3.4. Експеримент за формулацију Weber-ог закона [1]

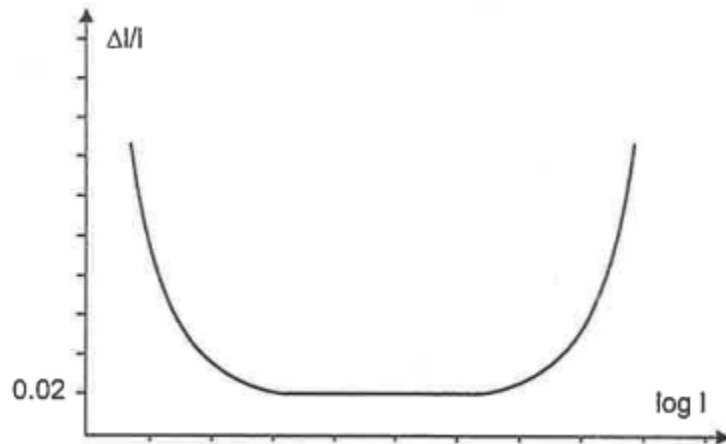
$$\frac{|\Delta l|_{\min}}{l_s} \approx 0.2 \quad (3.6)$$

где је:

l_s – осветљеност позадине,

Δl - најмања разлика осветљености која се може визуелно регистровати и

$l_s + \Delta l$ – осветљеност објекта (слика 3.5).



Слика 3.5. Зависност најмање релативне разлике осветљености од осветљености [1]

Експерименталним путем доказано је да је распон осетљивости визуелног система доста велики, реда 10^{10} пута, познато је да визуелни систем човека може разликовати око 50 нијанси сиве боје. Заменом разлике осветљености диференцијалом једначину (3.6) сводимо на диференцијалну једначину:

$$\frac{dl}{l} = d(\log l) = d(c) \quad (3.7)$$

$$c = a_0 + a_1 \cdot \log l \quad (3.8)$$

Величина c представља контраст, док константе a_0 и a_1 добијају се из граничних услова. Нпр. ако се тражи да се интервал осветљености (1,100) преслика у интервал контраста [0,100], онда је $a_0 = 0$, $a_1 = 50$, па је [1]:

$$c = 50 \log l \quad (3.9)$$

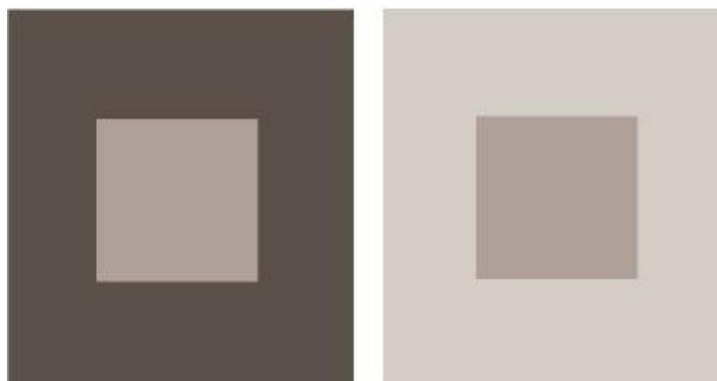
Постоје и друге везе између осетљивости и контраста, међу којима су најпознатије релације [1]:

$$c = a_n \sqrt[n]{l}, \quad n = 2, 3, \dots \quad (3.10)$$

За апроксимацију у опсегу $0 \leq l \leq 100$, $0 \leq c \leq 100$, за $n = 2$ узима се $a_2 = 10$, док се за a_3 узима $a_2 = 21,9$. Према томе користи се и релација:

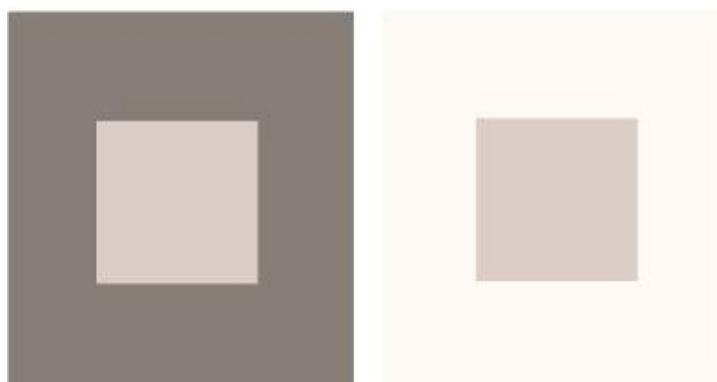
$$c = \frac{l(l_s + 100)}{l_s + l} \quad (3.11)$$

Према неким истраживањима *Weber*-ов закон није у потпуности тачан, јер на контраст и сјајност утиче појава која се назива адаптација на сјајност. Ако посматрамо слику 3.6, на којој су приказана два већа квадрата различите осветљености, док се у центру тих квадрата налази мањи квадрат чија је осветљеност иста. Оно што се уочава, иако је осветљеност оба мања квадрата иста, они изгледају неједнако светли, односно њихове сјајности су различите.



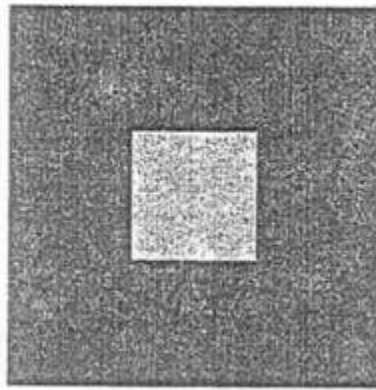
Слика 3.6. Адаптација на сјајност: објекти на средини позадине имају исте осветљености и различите сјајности [6]

Следећи експеримент приказан на слици 3.7, на којој су приказана два већа квадрата различитих осветљености, као и на слици 3.6. У овом случају је подешавањем осветљености објеката, квадрата у средини, они имају исту сјајност, мада су им осветљености различите.

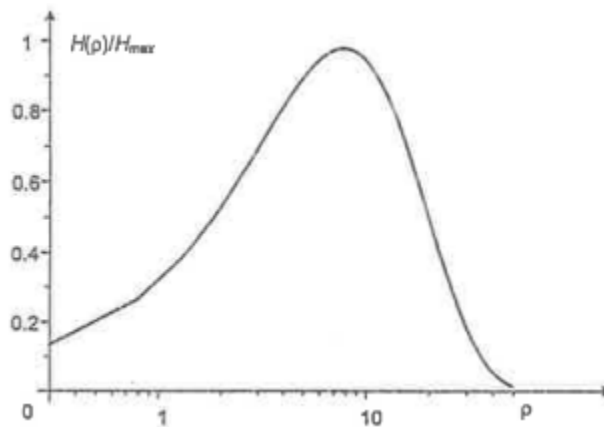


Слика 3.7. Адаптација на сјајност: објекти на средини позадине имају исте осветљености и различите сјајности [6]

Да би се квантитативно описала ова појава, неопходно је спровести један једноставан експеримент, тј. модификацију експеримента са слике 3.4. На слици 3.8, приказан је већи квадрат осветљености l_s , који представља позадину, као и један мањи квадрат који представља објекат. У поређењу са претходним експериментом, у овом случају је објекат подељен на два дела чије се осветљености мало разликују l_o и $l_o + \Delta l$. Када је $l_s = l_o$ добија се експеримент приказан на слици 3.4, али када је $l_s \neq l_o$, најмања приметна разлика $|\Delta l|_{min}$ се повећава, тада се осветљеност визуелног система посматрача на промене осветљености објекта смањује [1]. Појава приказана на слици 3.9, настаје услед адаптације визуелног система на осветљеност позадине, која има знатно већу површину. Осетљивост визуелног система је највећа у околини оног нивоа осветљености на који се визуелни систем адаптирао.



Слика 3.8. Адаптација визуелног система на сјајност позадине [6]

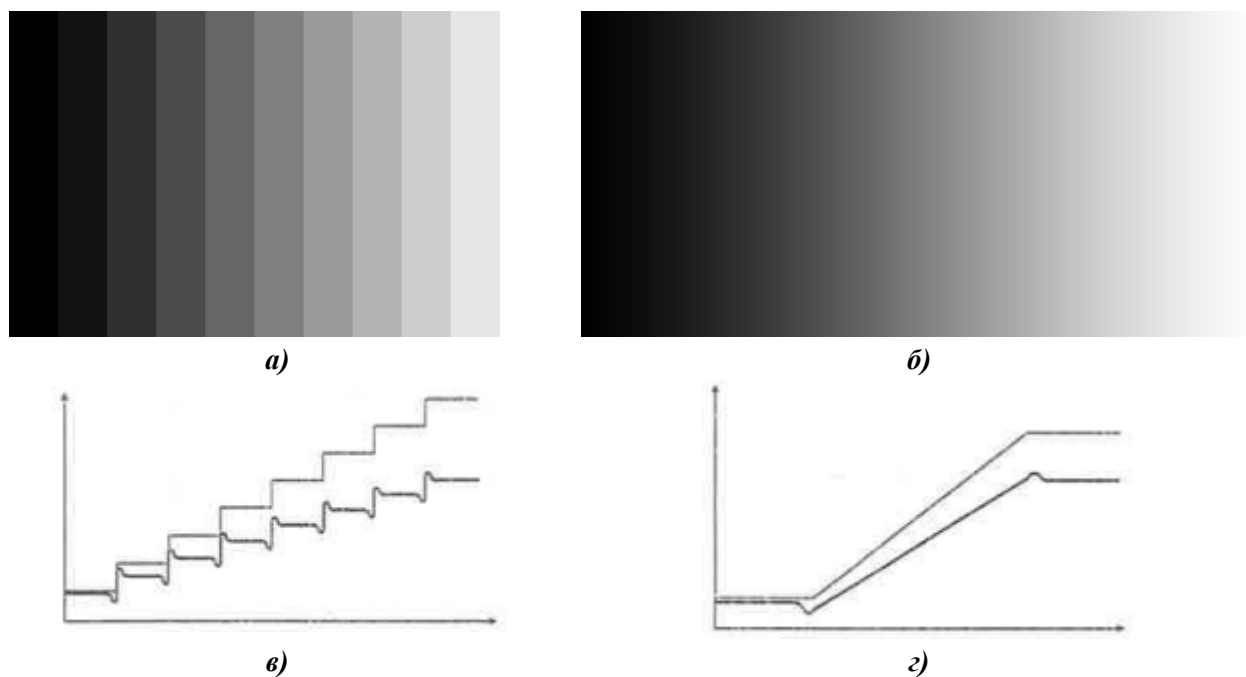


Слика 3.9. Зависност најмање релативне разлике осветљености од осветљености

Када је реч о сложенијим сликама, визуелни систем не успева да се адаптира на један ниво сјајности, већ се уместо тога он адаптира на неки средњи ниво сјајности, зависно од особине слике. Тада у било којој тачки слике или области *Weber*-ов однос је већи од 0,02, што је последица недовољно дефинисаних граница објекта и варијација сјајности позадине [1].

Последица ове особине је да визуелни систем у сложеним сценама може разликовати свега 20 до 30 нивоа сјајности у малој области слике. Најбоље се уочавају они детаљи слике где је сјајност околине приближно једнака средњој сјајности слике.

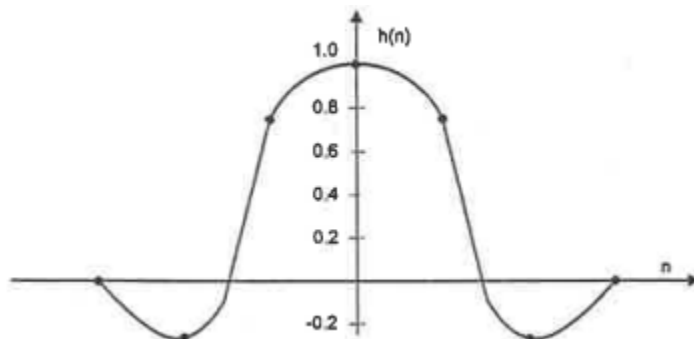
Просторна интеракција осветљености суседних објеката ствара феномен који се назива Махов ефекат [1]. Овај феномен открива да веза између осветљености и сјајности не мора бити монотона (једнолика). На слици 3.10, која се састоји од низа вертикалних пруга приказан је феномен Маховог ефекта. Слика се састоји од низа вертикалних пруга од којих свака има константну осветљеност која се степенасто мења, гледајући са десна на лево.



Слика 3.10. Махов ефекат [1]

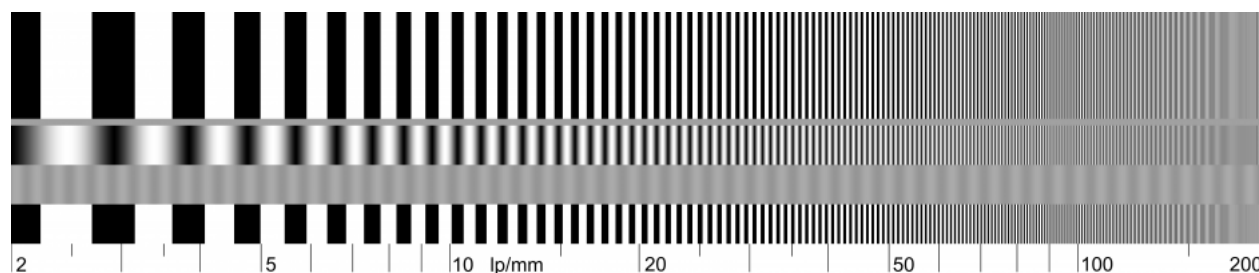
Са слике 3.10а, се уочава да сјајност сваке пруге изгледа неједнако, иако је њена осветљеност константна (непромењена). Свака пруга изгледа светлије, посматрано са лева на десно због утицаја суседне пруге која је тамнија, односно тамнија са десне стране због утицаја суседне светлије пруге. Дијаграм на слици 3.10в приказује да тања линија означава промену осветљености, а дебља линија промену сјајности, тј. субјективни осећај осветљености. Махов ефекат се може уочити и при постепеној промени осветљености, слика 3.10б. Дијаграм 3.10г приказује линеарну промену осветљености и одговарајућу промену сјајности са премашењем и подбачајем.

Такође, Махов ефекат се може применити код процене импулсног одзива визуелног система човека. Импулсни одзив, слика 3.11, има облик „звонасте“ криве са два негативна бочна лука. Ови бочни лукови представљају појаву која се назива латерална инхибиција.

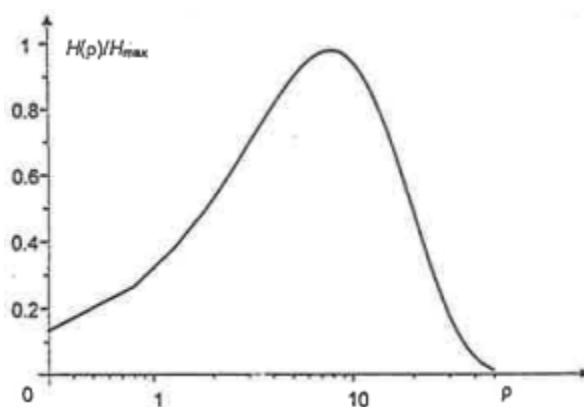


Слика 3.11. Импулсни одзив визуелног система [1]

Применом Фуријеове трансформације импулног одзива визуелног система добија се фреквенцијски одзив визуелног система из кога се може одредити модулативна функција преноса (MTF). Модулативна функција преноса се може одредити и мерењем, користећи тест слику, слика 3.12. Може се уочити да се према синусоидном закону мења контраст и просторна учестаност. Ако се ова слика посматра са одређене удаљености може се уочити праг видљивости при различитим учестаностима (понављањима). На слици 3.13, приказана је крива која представља праг видљивости у функцији просторне учестаности MTF визуелног система посматрача.



Слика 3.12. Одређивање MTF визуелног система посматрача [7]



Слика 3.13. Нормализована крива MTF визуелног система посматрача[1]

На дијаграму 3.13, уочава се да MTF визуелног система посматрача има облик филтера пропусника опсега учестаности са максимумом негде између 3 и 10 Hz/°. MTF посматрача такође зависи и од оријентације тест слике. Показано је да је MTF већа за вертикалну и хоризонталну оријентацију пруга, а мања када се тест слика ротира за 45°. Варијације MTF у зависности од угла ротације нису велике, мање од 3 dB, и често се могу занемарити. Тада се MTF визуелног система може сматрати изотропном [1]. Израз који приближно описује ову криву гласи [1]:

$$H(\omega_x, \omega_y) = H(\rho) = A \left[\alpha + \frac{\rho}{\rho_o} \right] e^{-\left(\frac{\rho}{\rho_o}\right)^\beta}, \quad \rho = \frac{\sqrt{\omega_x^2 + \omega_y^2}}{2\pi} \quad (3.12)$$

где су:

- A , α , β и ρ_o – константе.

Ако је $\alpha = 0$ и $\beta = 1$, тада је ρ_o просторна учестаност за коју MTF има максимум. Код компресије слике препорука је да се користе следеће вредности $A = 2,6$, $\alpha = 0,0192$, $\beta = 1,1$, $\rho_o = 8,772$. Ове вредности су експериментално установљене.

Код визуелног система човека, при обради секвенце слика или телевизијског и видео сигнала од велике важности је временска карактеристика визуелног система. При пројектовању видео монитора, познавање временских карактеристика је од великог значаја, нпр. у рачунарској графици. Побуђивање визуелног система врши се светлосним импулсима различитог трајања и различите енергије. Треба напоменути да се разлика у трајању импулса не може регистровати ако је трајање краће од „критичног“ трајања. Према Bloch-овом закону критично трајање је око 30 ms када је око адаптирано на просечан ниво осветљености [1]. Ако се око адаптира на нешто нижи ниво осветљености, нпр. сумрак, тада се „критично“ трајање повећава. Када побуђивање визуелног система врши периодичним светлосним импулсима, они се могу разликовати само када је учестаност побуде довољно ниска.

3.3. Колор систем у преносу дигиталне слике

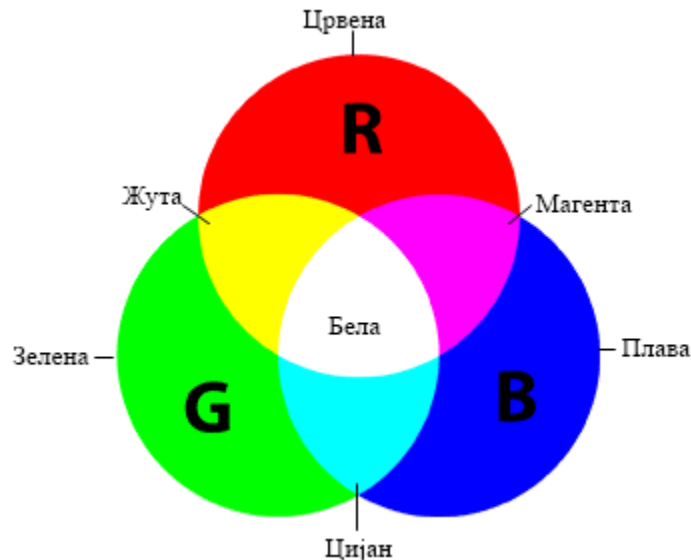
Боја представља врло важан иницијатор визуелних информација. Поред тога што визуелни систем препознавања боја код човека није у потпуности истражен, познато је да на мрежњачи постоје три врсте чепића чије су спектралне осетљивости различите и који су максимално осетљиви на црвену, зелену и плаву боју. Збир свих побуда одређује осећај сјајности, а однос појединих побуда одређује боју. Познато је да сваку боју карактеришу три атрибута: сјајност, нијанса или врста боје и засићење или чистоћа. Иначе, сјајност представља субјективни осећај осветљености. У случају када је светлост монохроматска, тада је нијанса боје одређена њеном таласном дужином. Ако се светлост састоји од више

компонената, тада нијансу одређује доминантна таласна дужина. Засићење одређује количину беле боје која је додата монохроматској светлости.

У случају када се врши комбинација два светлосна извора, чије су спектралне густине енергије $f_1(\lambda)$ и $f_2(\lambda)$ добија се светлост са спектралном густином енергије која је једнака збиру појединачних спектралних густина [1]:

$$f(\lambda) = f_1(\lambda) + f_2(\lambda) \quad (3.13)$$

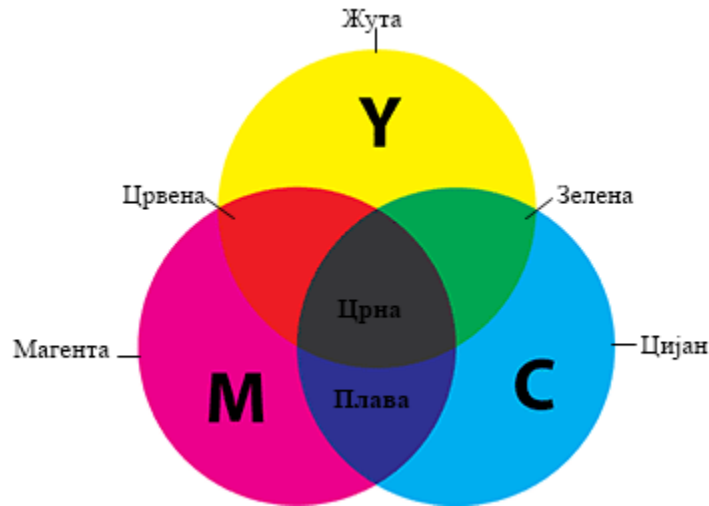
Систем генерисања сложених боја назива се још и адитивни колор систем. Познато је да се са три основне боје може генерисати велики број нијанси боја који се срећу у природи. Ове основне боје називају се још и примарне боје, а колор систем се назива трихроматски. Најшири опсег боја добија се када се за примарне боје изаберу црвена, зелена и плава. Према томе, понекад се адитивни колор систем назива и RGB колор систем (енг. red, green, blue). Према препорукама CIE из 1931. године примарне дужине таласних примарних боја су $\lambda_R = 700 \text{ nm}$, $\lambda_G = 546,1 \text{ nm}$ и $\lambda_B = 435,8 \text{ nm}$ [1]. На слици 3.14, приказан је адитивни систем мешања боја. Боја добијена мешањем једнаких количина светлости само две примарне боје назива се секундарна боја (цијан, магента и жута). Мешањем једнаких количина светлости све три примарне боје добија се бела светлост.



Слика 3.14. Примарне и секундарне боје у адитивном колор систему [8]

Међусобно мешање светлости из различитих светлосних извора није једини начин на који се остварује генерисање сложених боја у природи. Учестлији начин генерисања сложених боја настаје у случају рефлексије светлости од објеката. Познато је да сваки објекат садржи молекуле, тзв. пигменте, који имају различите спектралне карактеристике апсорпције светлости. У случајевима када бела светлост, која се састоји од великог броја таласних дужина, осветли неки објекат пигменти апсорбују један део светлости. На тај

начин врши се мењање боје светлости која се рефлектује. Према томе, систем генерисања боја је заснован на одузимању компонената, па се из тог разлога назива још и субтрактивни колор систем. Практичну примену овог систем срећемо у штампарској и текстилној индустрији, као и у сликарству. У субтрактивном систему примарне боје су цијан, магента и жута (енг. *cyan, magenta, yellow*), а које су секундарне боје у адитивном колор систему, док су црвена, плава и жута, које су примарне боје адитивног система истовремено и секундарне боје у субтрактивном колор систему. Субтрактивни колор систем скраћено се назива CMY колор систем, слика 3.15.



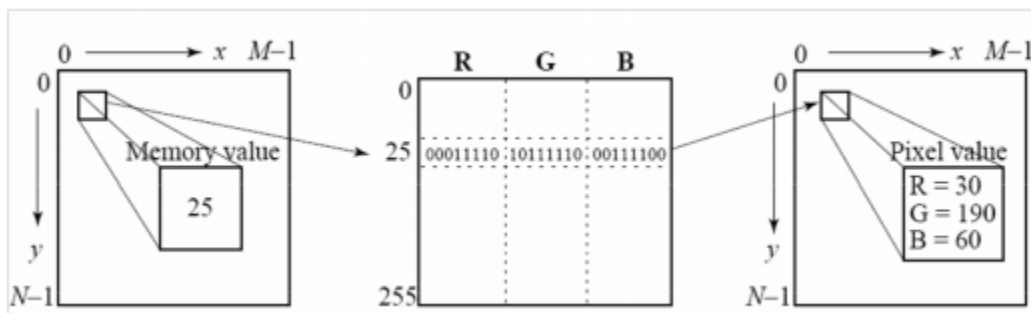
Слика 3.15. Примарне и секундарне боје у субтрактивном колор систему [8]

За опис боје се користе различити модели. Савремени дисплеји углавном користе RGB модел код којег колор компоненте садрже вредности пиксела у црвеном, зеленом и плавом делу спектра. Сlike у боји је могуће представити на два начина, као „битмапиране“ и као индексиране слике. Битмапиране слике за репрезентацију сваког пиксела користе три бајта, односно, $3 \times 8 = 24 \text{ bits}$. На овај начин је могуће представити $256^3 = 16.777.216$ боја. Сама слика се меморише коришћењем три матрице од којих свака садржи вредности интензитета пиксела за једну компоненту. Заменски, могуће је користити и тродимензионални низ, при чему две димензије одговарају просторним координатама, док трећа колор-компонентама. У овом случају слика димензија 640×480 заузима $640 \times 480 \times 3$ бајтова = 900 kb [9]. На слици 3.16, приказан је пример слике у боји и њених колор-компонената.



Слика 3.16. Слика „Лена“ у боји и њене R, G и B компоненте [9]

Битмапиране слике у bit-има заузимају три пута више меморије од дигиталних слика исте резолуције. Ипак, узимајући у обзир да нису све од 16 милиона боја доступних у 24-битној репрезентацији једнако заступљене на свакој слици, може се закључити да је могуће слику приказати употребом мање од 3 бајта по пикселу. Треба узети у обзир евентуални губитак визуелног квалитета. Индексиране слике за представљање сваког пиксела користе 1 бајт помоћу табеле за претраживање о информацијама о боји [9]. Прорачунска таблица се још назива и мапа боја или палета боја. Када се 1 бајт користи за представљање пиксела, табела садржи 256 ставки, што одговара палети од 256 боја. За представљање слике, потребна је матрица димензија једнака резолуцији слике и табела. Сваки елемент матрице заузима 1 бајт, тако да табела садржи 256 ставки које заузимају 3 бајта. Сваки бајт одговара једној компоненти боје, R, G и B. Матрица боја се чува за сваки индекс пиксела - реда у палети. Код одређивања боје пиксела потребно је прочитати вредност реда у палети, а онда из палете и саму боју пиксела. Овај процес је илустрован на слици 3.17.



Слика 3.17. Палета боја за индексиране 8-битне слике у боји [9]

Како би се кроз сигнал веродостојно представиле боје, неопходан је избор одговарајућег координатног система. Тако је настала колориметрија, наука која се бави мерењем и квантитативним представљањем боја. Код адитивног колорног система, црвеном, зеленом и плавом примарном бојом, светлост произвољне боје се може квантитативно представити вектором у 3D простору [1]:

$$C = R\mathbf{R} + G\mathbf{G} + B\mathbf{B} \quad (3.14)$$

где су $\mathbf{R}$, $\mathbf{G}$ и $\mathbf{B}$, ортогонални јединични вектори који дефинишу три примарне боје у 3D простору, а R , G и B количине примарних боја или координате боје за дефинисање боје. Трећи податак који дефинише светлост је осветљеност или луминанса $Y = R + G + B$, добијају се хроматске координате боје дефинисане односима [3]:

$$r = \frac{R}{R + G + B}, g = \frac{G}{R + G + B}, b = \frac{B}{R + G + B} \quad (3.15)$$

Квантитативне вредности боје координата боје, R , G и B зависе од избора примарних боја и дате су изразима [1]:

$$R = k \int_0^{\infty} f(\lambda) \bar{r}(\lambda) d\lambda \quad (3.16)$$

$$G = k \int_0^{\infty} f(\lambda) \bar{g}(\lambda) d\lambda \quad (3.17)$$

$$B = k \int_0^{\infty} f(\lambda) \bar{b}(\lambda) d\lambda \quad (3.18)$$

где су $r(\lambda)$, $g(\lambda)$ и $b(\lambda)$ тежинске функције или дистрибуциони коефицијенти примара, а $f(\lambda)$ спектрална карактеристика светлости која се разлаже на компоненте. Вредности дистрибуционих коефицијента $r(\lambda)$, $g(\lambda)$ и $b(\lambda)$ се означавају са R_C , G_C и B_C .

У пракси се сусреће још неколико колор координатних система. Разлог њиховог увођења је тај да би се ускладио избор примарних боја са карактеристикама фосфора који се раније користио за производњу катодних цеви код TV пријемника и монитора. Најпознатији је био амерички NTSC колор координатни систем за пријемнике (R_N , G_N и B_N) и интернационални SMEPT колор координатни систем за пријемнике (R_S , G_S и B_S). Везе координата из ова три координатна система су линеарне и могу да се представе матричном трансформацијом [1]:

$$\begin{bmatrix} R_o \\ G_o \\ B_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_i \\ G_i \\ B_i \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

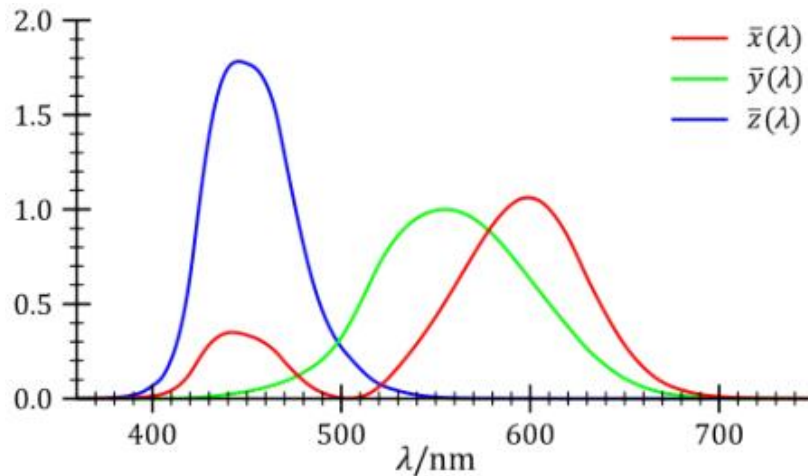
Ако се узме да су вредности R , G и B , координата у сва три наведена система коначне и позитивне, поједине природне боје се не могу добити адитивним мешањем дефинисаних примара, јер захтевају негативне вредности координата [1]. Тако је дефинисан нови стандард заснован на фиктивним примарним бојама, помоћу којих се може синтетизовати некаква природна боја користећи само позитивне вредности координата. Према ознакама за примарне количине боја X , Y и Z , такав систем се назива XYZ колор координатни систем. Везе XYZ координатног система са осталим системима, такође, су линеарне.

Функција упаривања боја омогућава приказивање произвољне боје износима три примарне боје које су потребне да се произведе светлост те боје. Ове три вредности одређују координате боје у 3D простору који се назива колор-простор. Колор простор је вишедимензионални простор чије координате одговарају компонентама за приказивање боје. Таласне дужине примарних боја одговарају црвеној, зеленој и плавој боји – RGB. RGB колор-простор представља се коцком, слика 3.18. RGB колор-простор се употребљава у случајевима у којима се боја формира коришћењем извора светлости, као што су дисплеј и пројектор.



Слика 3.18. RGB колор-простор [9]

Да би се избегло коришћење негативне светлости, оформљен је нови колор-простор CIE XYZ. Примарне боје су у CIE XYZ колор-простору су биране тако да се све боје могу приказати коришћењем ненегативних вредности примарних боја, тј. да функције упаривања $x(\lambda)$, $y(\lambda)$ и $z(\lambda)$ имају ненегативне вредности на целом дијапазону таласних дужина видљиве светлости. Линеарном трансформацијом функцијом у RGB колор-простору формирају функције упаривања у CIE XYZ колор-простору. Концепција трансформације је изабрана тако да функција $y(\lambda)$ одговара укупној осетљивости човековог вида (*luminous efficiency*), $V(\lambda)$. Функције упаривања боја у CIE XYZ колор-простору приказане су на слици 3.19. Може се уочити да су функције упаривања боја сада ненегативне на целом опсегу таласних дужина видљиве светлости.



Слика 3.19. Функције упаривања боја у CIE XYZ колор-простору [9]

Како би се омогућио пренос видео и телевизијског сигнала формиран су посебани колор координатни системи. Ови координатни системи морају да задовоље два примарна захтева, а то су: компатибилност црно-белог и колор TV сигнала и редуковање нивоа учестаности потребног за пренос TV сигнала.

Европски PAL и SECAM телевизијски стандарди дефинишу YUV колор систем. Код YUV колор система Y компонента представља луминансу боје и назива се луминентна компонента и означава способност перцепције сјајности слике у боји. Луминанса се дефинише изразом [1]:

$$Y = 0,299R_N + 0,587G_N + 0,144B_N \quad (3.20)$$

где су R_N , G_N и B_N координате боје из NTSC R_N G_N B_N колор координатног система за пријемнике. Луминентна компонента има најшири спектар просторних учестаности и носи информације о детаљима слике. Примена Y компоненте омогућава компатибилност са црно-белим TV сигналом. Хроминентне компоненте U и V описују нијансу и засићене боје, а дате су изразом [1]:

$$\begin{aligned} U &= 0,493(B_N - Y) \\ V &= 0,877(R_N - Y) \end{aligned} \quad (3.21)$$

NTSC телевизијски стандард који се примењује у САД и Јапану, користи YIQ колор систем за представљање боја. У YIQ колор систему Y компонента представља луминансу боје и дефинисан је изразом (3.20) исто као и код YUV колор система. Како је спектар I и Q сигнала има знатно ужи спектар од Y сигнала, аналогном модулацијом омогућено је да опсег учестаности колор TV сигнала сведе на опсег учестаности црно-белог TV сигнала.

Прелаз са RGB система на YIQ систем и обрнуто обавља се линеарном трансформацијом. При обради слике у боји YUV и YIQ система значајне су две предности у односу на RGB систем. Једна предност јесте то што се обрађује само луминентна компонента. Друга предност је у томе што се хроминентне компоненте због ужег спектра могу дискредитовати користећи нижу учестаност одабирања, тако да се ради са мањом количином података [1].

За потребе стандардизације дигиталне студијске технике у телевизији, развијена је модификација аналогног система, која се назива YCbCr колор координатни систем. Луминанса је као и код аналогних YUV и YIQ система дефинисана изразом (3.20).

Хроминентне компоненте Cb и Cr дате су изразима [1]:

$$C_b = 0,564(B_N - Y) \quad (3.22)$$

$$C_r = 0,713(R_N - Y) \quad (3.23)$$

Веза YCbCr система са RGB системом дата је матричном трансформацијом [1]:

$$\begin{bmatrix} T \\ C_b \\ C_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,29900 & 0,58700 & 0,11400 \\ -0,16784 & -0,33126 & 0,50000 \\ 0,50000 & -0,41869 & -0,08131 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

Инверзна трансформација приказана је матричном једначном [1]:

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,00000 & 0,00000 & 1,40200 \\ 1,00000 & -0,34414 & -0,71414 \\ 1,00000 & 1,77200 & 0,00000 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T \\ C_b \\ C_r \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

Како је највећа примена YCbCr колор система у дигиталној телевизији и дигиталној обради слике неопходно је величине Y, Cb и Cr представити у дигиталној форми. Углавном се користи представа са 8 bita, па бројне вредности могу бити у опсегу од 0 до 255. Како би се спречило прекорачење опсега, према стандарду за луминансу користи се само 220 нивоа, од 16 до 235, па израз за дигиталну вредност луминансе гласи [1]:

$$Y' = 219Y + 16 \quad (3.26)$$

За хроминентне компоненте дозвољено је користити 225 нивоа од могућих 256, при чему нултом нивоу одговара дигитална вредност 128, па је [1]:

$$C'_b = 224 \cdot 0,564 \cdot (B_N - Y) + 128 = 126 \cdot (B_N - Y) + 128 \quad (3.27)$$

$$C'_r = 224 \cdot 0,713 \cdot (R_N - Y) = 160 \cdot (R_N - Y) + 128 \quad (3.28)$$

Применом израза (3.27) и (3.28) се приликом претварања реалних бројева у целе бројеве користи заокруживање на најближу целу вредност.

Претходно анализирани колор системи нису перцептуално униформни, јер се једнаким променама координата боје не постиже једнака промена субјективног осећаја боје. Односно не постиже се субјективни осећај промене нијансе и засићења. Први корак у постизању униформности представља увођење USC или UWV колор система, још 1960. године, а чије се хроматске координате могу представити изразом [1]:

$$u = \frac{4X}{X + 15Y + 3Z} = \frac{4x}{-2x + 12y + 3}$$

$$u = \frac{4X}{X + 15Y + 3Z} = \frac{4x}{-2x + 12y + 3} \quad (3.29)$$

Модификацијом UWV колор система, како би се добио колор координатни систем, односно како би се једначине промене луминансе и хроминансе једнако осећале, CIE је 1964. године предложио $U^* V^* W^*$ колор координатни систем, који дефинишу изрази [1]:

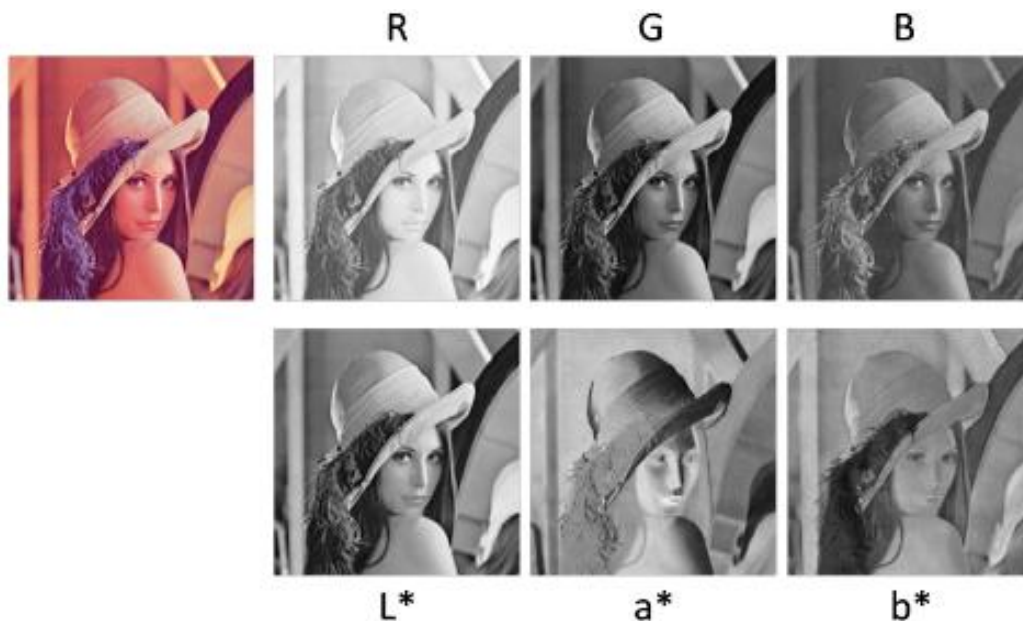
$$W^* = 23\sqrt[3]{100Y} - 17, \quad 0,01 \leq Y1$$

$$U^* = 13W^*(u - u_0)$$

$$V^* = 13W^*(v - v_0) \quad (3.30)$$

где су u_0 и v_0 хроматске координате референтног осветљења на које је посматрач адаптиран. UWV и $U^* V^* W^*$ колор системи су 1976. године замењени тачнијим $L^* a^* b^*$ и $L^* u^* v^*$ колор координатним системима.

На слици 3.20, је приказана слика у боји са њеним компонентама у RGB и $L^* a^* b^*$ колор-просторима. Уочава се да a^* оса одговара скали од црвене/магента до зелене (негативне вредности зелене и позитивне магента) боје, док b^* оса одговара скали од жуте до плаве (негативне вредности плаве и позитивне жуте) боје [9]. RGB и CIE XYZ су адитивни колор-модели. Адитивни модели су погодни за описивање мешања светлости различитих боја, нпр. код монитора. Ако се боја добија наношењем тинте на подлогу – папир онда је сврсисходнија примена суптрактивног колор-модела.



Слика 3.20. Слика „Лена“ и њене компоненте у RGB и $L^*a^*b^*$ колор-просторима [9]

Трећа врста колор координатног система изведена је да би се извршио квантитативни опис боје помоћу природних параметара којима се описује боја, сјајност, нијансе и засићеност боје. Један од ових колор координатних система је и IHS колор координатни систем, а који се дефинише релацијом [1]:

$$\begin{bmatrix} I \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/3 & 1/3 & 1/3 \\ -1/\sqrt{6} & -1/\sqrt{6} & 2/\sqrt{6} \\ 1/\sqrt{6} & -2/\sqrt{6} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_N \\ G_N \\ B_N \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

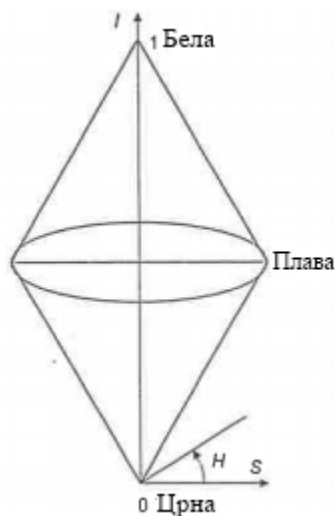
Када се пређе на поларне координате, слика 3.21, следи [1]:

$$H = \tan^{-1} \left(\frac{V_2}{V_1} \right)$$

$$S = \sqrt{V_1^2 + V_2^2} \quad (3.32)$$

Према слици 3.21, односно према дефиницији плава боја је нулта референца за нијансу боје, јер се за $R_N = G_N$ и $B_N \neq 0$ добија да је $H = 0$.

Такође, у употреби је још један колор координатни систем, а то је HLS координатни систем који своју примену налази у рачунарској графици. Код овог координатног система H лежи у опсегу од $0 \leq H < 360$, док су остале координате у опсегу $0 \leq R, G, B, L, S \leq 1$.



Слика 3.21. Дефиниција IHS колор координатног система [1]

Прелаз из RGB у HLS координатни систем изводи се помоћу следећег израза [1]:

$$M = \max(R, G, B)$$

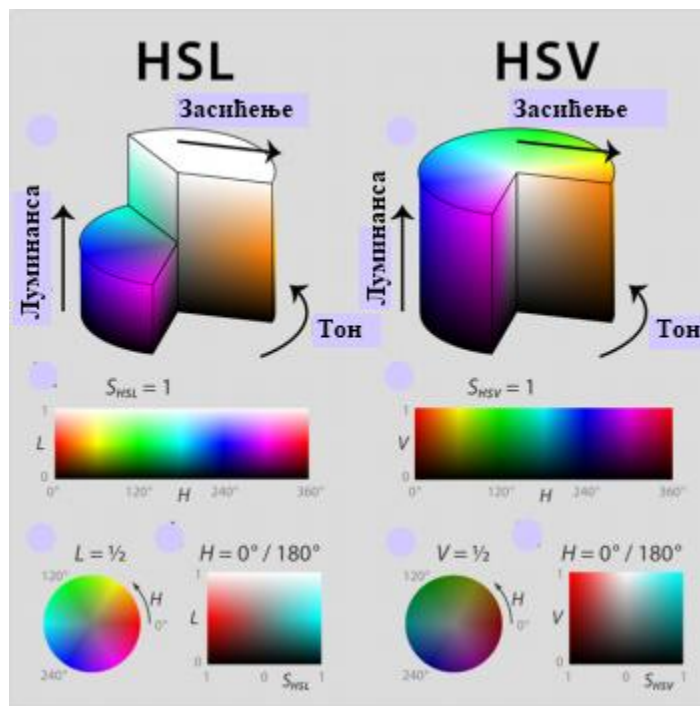
$$m = \min(R, G, B)$$

$$r = \frac{M - R}{M - m}, \quad g = \frac{M - G}{M - m}, \quad n = \frac{M - B}{M - m} \quad (3.33)$$

$$L = \frac{M + m}{2} \quad (3.34)$$

У софтверу за обраду слике и рачунарску графику се користе неки од модела HSI, HSL или HSV координатних система. Ови модели су настали како би се формирао концепцијски униформнији колор-простор, као и да се избор боја у корисничком софтверу буде интуитиван. Циљ је да се омогући приближавање боја на онај начин на који човек размишља о бојама.

Н (*hue*) компонента се у овим просторима приближно дефинише и представља тон. S (*saturation*) компонента представља засићење боје и њене дефиниције се разликују у овим моделима, без обзира на исту ознаку. L (*lightness*), V (*value*) и I (*intensity*) су различити покушаји да се опише луминанса коју корисник опажа [9]. HSL и HSV модели су илустровани на слици 3.22, а пример компонената слике у HSV колор-простору дат је на слици 3.23.



Слика 3.22. HSL и HSV колор координатни систем [9]



Слика 3.23. Компоненте слике „Лена“ у HSV колор координатном систему [9]

У штампарству се углавном примењују субтрактивни колор системи, а врло често у текстилној индустрији и фотографији. У овим областима често постоји потреба за квантификацијом компонента боја. Основни субтрактивни колор координатни систем је СМУ, чије се боје специфицирају тако што се одузима од белог светла. СМУ координате се лако могу извести из координатног RGB система [1]:

$$\begin{aligned}C &= 1 - R \\M &= 1 - G \quad (3.35) \\Y &= 1 - B\end{aligned}$$

Ипак у штампарској индустрији се због несавршености мешања боја не може добро генерисати црна боја. Због тога је уведен СМУК колор координатни систем, који поред три примарне боје користи и црну боју (K) као четврту. Координате боје у СМУК колор координатном систему се добијају тако што се прво примени трансформација израза (3.34), а потом се изврши модификација СМУ координата користећи следеће релације [1]:

$$\begin{aligned}K &= \min(C, M, Y) \\C &= C - K \\M &= M - K \quad (3.36) \\Y &= Y - K\end{aligned}$$

4. Дигитализација слике

Дигитализација је процес превођења једног објекта, слике, у дигитални облик. Резултат овог процеса је дигитални објекат, односно дигитална слика за објекат. Дигитализација представља записивање аналогног сигнала у дигиталном облику, што би значило да слика објекта прати визуелни идентитет, оквире и структуру самог објекта.

4.1. Дигитализација монохромне слике

Методи просторне и амплитудске дискретизације примењују се за дигитализацију слике, односно монохромних и колор слика. Дигитална монохромна слика представља се као низ бинарних података фиксне дужине дигиталне речи. Како су подаци позитивни није неопходно коришћење бита за знак. Ако се са приказивање слике користи B бита по пикселу, укупан број амплитудних нивоа је [1]:

$$L = 2^B \quad (4.1)$$

док је број бита за репрезентацију целе слике, димензија $M \times N$ пиксела [1]:

$$B_{\text{TOT}} = M \times N \times B \quad (4.2)$$

Људско око је способно да разликује око 10 до 15 апсолутних нивоа сјајности, а сама осетљивост ока је већа за 2% за уочавање сјајности суседних региона [1]. Према томе, минималан број бита који се користи у систему за обраду слике је углавном 6, а чему одговара 64 нивоа сивог у слици. У пракси се најчешће користи 8 bita (1 bajt) по пикселу, док се за дигитализацију медицинских слика често користи 10 и 12 bita по пикселу. Ако се смањује број бита за репрезентацију амплитуде сјајности добија се компресија слике. Када се број нивоа смањује јавиће се изобличења слике, односно појава контура у слици. Односно, када се за квантовање користи мали број нивоа, у деловима слике где се сјајност мало мења, при реконструкцији долази до скоковите промене сјајности два пиксела, иако су им стварне вредности амплитуда врло блиске. Уочавање контура зависи и од карактеристика система за репродукцију слике, као и постојања шума на слици. На слици 4.1, приказана је слика представљена са 4, 6 и 8 bita по пикселу.

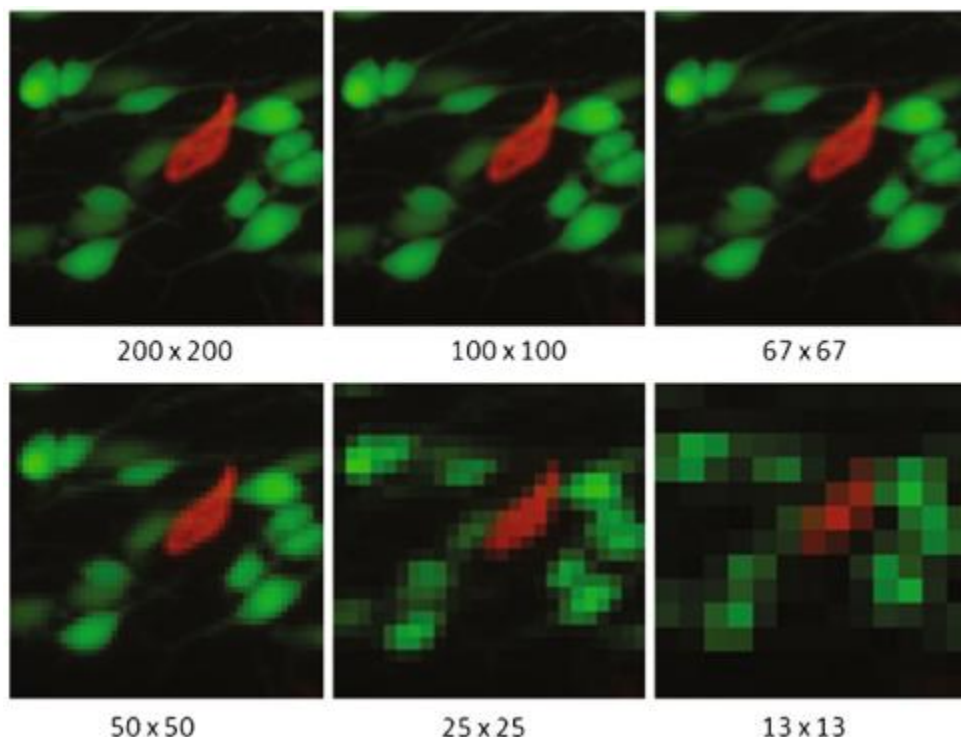


Слика 4.1. Утицај броја бита на квалитет слике: 4, 6 и 8 bita (са десна на лево) [9]

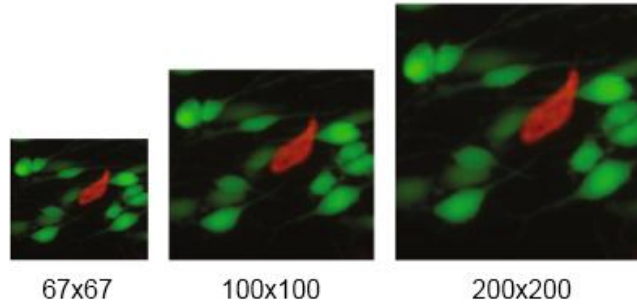
Још једна важна карактеристика дигиталне слике јесте број пиксела у слици или просторна резолуција дигиталне слике. При обради слике из практичних разлога је број пиксела у врстама и колонама слике најчешће степен броја 2. Данас се у мањој или већој мери употребљава велики број формата фајлова за растерске слике (укупан број пиксела, као и број вредности за сваки појединачни пиксел). Најчешће коришћени су:

- GIF – Graphics Interchange Format;
- JPEG – Joint Photographics Experts Group;
- PNG – Portable Network Graphics;
- TIFF – Tagged Image File Format;
- BMP – MS Windows Bitmap.

Утицај на субјективни квалитет слике има просторна резолуција. Утицај просторне резолуције на субјективни квалитет у великој мери зависи од величине једног пиксела у репродукцији слике [1]. Када се изврши подешавање величине слике, тако да она буде независна од резолуције, слика 4.2, код слика мале резолуције може се уочити блоковска структура. У случају да су величине пиксела независне од резолуције, слика 4.3, тада слике различитих резолуција имају различите физичке димензије. Код оба случаја, ако је просторна резолуција мала, слабије се уочавају детаљи на слици.



Слика 4.2. Утицај просторне резолуције на квалитет слике када је величина слике константна [10]



Слика 4.3. Утицај просторне резолуције на квалитет слике када је величина пиксела константна [10]

4.2. Дигитализација колор слике

Дигитализација колор слике, изводи се дигитализацијом све три компоненте боје које се користе у координатном колор систему [1]. Како сви сензори генеришу RGB сигнал, углавном се врши дигитализација примарних R, G и B сигнала боје. За дигитализацију примарних сигнала користе се исти принципи као и за дигитализацију монохромних слика.

За дигитализацију сваке компоненте, углавном, се користи 8 bita, па је тако број могућих нијанси боја $2^{24} = 16777216$, што знатно превазилази визуелну могућност човека. За памћење само једне 24 bit-не колор слике димензија 512x512 потребно је 786,5 Mb [1]. Из тог разлога често се користи мањи број бита по компоненти, најчешће 3 до 6 bita, а некада се при дигитализацији слике примењује и неједнак број бита за сваку компоненту. Ако је познато да је око највише осетљиво на промену интензитета плаве боје, умерено осетљиво на промене интензитета зелене боје, а најмање осетљиво на промене интензитета црвене боје, онда је могуће да се свакој компоненти боје доделити тачан број бита који се слаже са осетљивошћу ока на промену те компоненте.

Познато је да су боје у 3D RGB координатном систему неједнако распоређене. Када би све боје имале исту вероватноћу, једнаку густину расподеле, квантизационе ћелије у RGB координатном систему би требале имати неједнаке величине, јер исте промене координата боје не изазивају исте промене у осећању боје. Дигитализација слике, најчешће се врши тек после трансформације слике у неки перцептуално јединствен простор $C_1C_2C_3$, слика 4.4. Одабир квантизера и трансформације слике извршава се помоћу одређеног критеријума за минимизацију грешке боје услед дигитализације слике.



Слика 4.4. Квантовање слике у боји [1]

Квантизер приказан на слици 4.4, дели простор $C_1C_2C_3$ у квантизационе ћелије и распоређује једну боју свим тачкама у свим ћелијама. При оптималној квантизацији неопходно је извршити заједничко квантовање све три компоненте боје C_1 , C_2 и C_3 , тј. применити векторску квантизацију. Због проблема при спровођењу квантизације, компоненте боје C_1 , C_2 и C_3 се посебно квантују, тако да квантизационе ћелије имају облик паралелоипеда. Поред тога, већина квантизационих ћелија презентују боје које се не могу репродуковати, те простор није адекватно искоришћен.

Упракси се највише користе трансформације $RGB \rightarrow YIQ$ и $RGB \rightarrow YUI^*$, јер се у аналогној форми највише примењују у телевизији. Такође, ове трансформације имају додатну погодност што је спектар хроминентних компонената I и Q , односно U и I^* , доста ужи, па је тако омогућена просторна дискретизација са нижом учестаношћу одабирања. У ITU-R 601 стандарду, који прописује поступак формирања дигиталне колор слике на телевизији, уведен је нови стандард $Y_C R_C$ [1].

4.3. Основне карактеристике дигиталне слике

Монохромна слика има поједине карактеристике које се интезивно користе у алгоритмима за обраду. Најчешће се примењује средња вредност интезитета слике $M \times N$ пиксела, а израчунава се применом једначине [1]:

$$L_{sr} = \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N L[m, n]}{MN} \quad (4.3)$$

где је $L[m, n]$ интензитет пиксела на позицији (m, n) .

Варијанса интезитета слике димензија $M \times N$ пиксела израчунава се на следећи начин [1]:

$$V_{ar} = \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N (L[m, n] - L_{sr})^2}{MN} \quad (4.4)$$

а стандардна девијација интезитета добија као квадратни корен варијансе [1]:

$$\sigma = \sqrt{V_{ar}} \quad (4.5)$$

Средња вредност интезитета даје процену просечне осветљености целе слике, док варијанса и стандардна девијација дају информације о промени интезитета у слици.

Максимална вредност интезитета слике димензија $M \times N$ пиксела израчунава се као [1]:

$$L_{max} = \max_{1 \leq m \leq M, 1 \leq n \leq N} (L[m, n]) \quad (4.6)$$

Док се минимална вредност интезитета слике $M \times N$ пиксела израчунава као [1]:

$$L_{min} = \min_{1 \leq m \leq M, 1 \leq n \leq N} (L[m, n]) \quad (4.7)$$

Минимална и максимална вредност интезитета дају информације екстремним вредностима интезитета у слици.

Хистограм слике даје информације о расподели нивоа сивог на слици, тако да када су на слици заступљени нивои сивог $L_{min} \leq L[i] \leq L_{max}$, тада се сваком нивоу сивог може придружити број пиксела који има тај интезитет. Ако се тај број означи, нпр. са $H[i]$, тада стандардни хистограм представља график у коме апциса представља вредност интезитета $L[i]$, док ордината представља број пиксела са одговарајућим интезитетом $H[i]$. Важи [1]:

$$\sum_{i=L_{min}}^{L_{max}} H[i] = MN \quad (4.8)$$

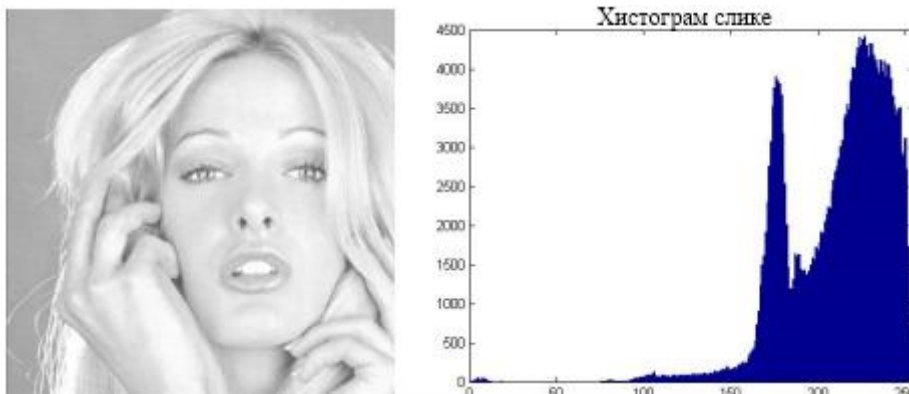
Нормализовани хистограм се добија ако се вредности стандардног хистограма поделе са бројем пиксела у слици [1]:

$$h[i] = \frac{H[i]}{MN} \quad (4.9)$$

тада је [1]:

$$\sum_{i=L_{min}}^{L_{max}} h[i] = 1 \quad (4.10)$$

На слици 4.5, приказан је пример израчунавања хистограма, где је приказана слика 256×256 пиксела, као и њен стандардни хистограм. За израчунавање хистограма употребљен је програм *Matlab*.



Слика 4.5. Дигитална слика 256×256 пиксела и хистограм слике [11]

4.4. Субјективне и објективне мере за оцену квалитета слике

Како би се у самој процени квалитета слике у обзир узела и реакција визуелног система човека, постоји читав низ метода и мера које се примењују за субјективну оцену квалитета слике. Познате су две врсте, односно групе метода субјективне оцене квалитета слике. Првој групи припадају поступци за оцену квалитета слике, где се квалитет слике не упоређује са референтном, а другој групи поступци где се слика увек упоређује са референтном сликом и врши се оцена насталих изобличења. Прва група поступака заснована је на коришћењу скале доброте са пет до седам нивоа квалитета. Пример такве скале је у табели 4.1.

<i>Табела 4.1. Скала доброте [1]</i>			
Глобална скала доброте		Групна скала доброте	
Изврсна	5	Најбоља	7
Добра	4	Доста изнад просека	6
Просечна	3	Мало изнад просека	5
Лоша	2	Просечна	4
Незадовољавајућа	1	Мало испод просека	3
		Доста испод просека	2
		Најгора	1

Пре спровођења теста посматрачима се морају презентовати слике за обуку са сликама свих квалитета. После тога посматрачима се приказује скуп слика који се оцењује. Сваки посматрач оцењује сваку приказану слику у складу са оценама из претходне табеле. На крају теста се своди просечна субјективна оцена, за сваку слику, према формули [1]:

$$R = \frac{\sum_{k=1}^n s_k n_k}{N_p} \quad (4.11)$$

где је:

s_k – нумеричка оцена k -тог нивоа квалитета према табели 4.1,

n_k – број посматрача који је дао ту оцену,

N_p – укупан број посматрача.

У табели 4.1, приказана је још једна скала доброте, а то је групна скала доброте, где се оцењују слике унутар једне групе. Код примене групне скале доброте није потребно вршити претходно обучавање посматрача, а просечна субјективна оцена израчунава се једначином (4.11).

Друга група поступака заснива се на коришћењу скале изобличења, табела 4.2, и користи се за оцену одступања слике у односу на референтну слику. Обе слике које се пореде се

приказују на монитору или једна за другом у секвенци. Просечна оцена се такође утврђује једначином (4.11).

<i>Табела 4.2. Склае изобличења [1]</i>	
Неприметна изобличења	1
Једва приметна изобличења	2
Приметна, али врло мала изобличења	3
Изобличења без утицаја	4
Понегде значајна изобличења	5
Значајна изобличења	6
Врло приметна изобличења	7

Објективне мере квалитета слике се највише примењују код компресије слике, када је потребно квантитативно проценити разлику између компримоване и оригиналне слике. Могу се употребљавати увек када постоји референтна слика за упоређивање са резултатом обраде. За процену одступања најчешће се користи средња квадратна грешка, изразом [1]:

$$\sigma_{ms}^2 = \frac{1}{MN} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N |y[m, n] - x[m, n]|^2 \quad (4.12)$$

Често се средња квадратна грешка изражава помоћу односа сигнал – шум (dB) као [1]:

$$SNR = 10 \log \frac{\sigma^2}{\sigma_{ms}^2} \quad (4.13)$$

где је σ^2 - варијанса референсе (оригиналне слике).

Погоднија мера за објективну оцену је вршни однос сигнал – шум, који се такође изражава у (dB). За представу осветљености пиксела са p bita (2^p нивоа), вршни однос сигнал-шум [1]:

$$PSNR = 10 \log \frac{(2^p - 1)^2}{\sigma_{ms}^2} \quad (4.13)$$

Може се закључити да не постоји егзактан поступак за процену квалитета слике. Тако се може рећи да су тзв. објективне мере лакше за израчунавање, али не дају поуздану оцену квалитета слике. Док се тзв. субјективним мерама дабијају поузданије оцене квалитета слике, али нису погодне за практичну примену из разлога дугих и скувих експеримената. Често се у последње време ради на развоју нових метода за објективну оцену квалитета слике, јер новије методе узимају у обзир и неке особине визуелног систем, па се тако добијају резултати који су приближнији субјективним мерама.

5. Основе побољшања квалитета слике

Методе које се користе за побољшање квалитета слике омогућавају да се обрадом полазне слике добије слика која је адекватнија за даљу примену, што значи да методе за побољшање квалитета слике зависе од начина употребе саме обрађене слике. Тако, методе за побољшање квалитета слике код рендгенских снимака имају веома мало сличности са методама за поправку снимака за отиске прстију у дактилоскопији и др.

Када се слика поправља да би добили бољи ефекат на монитору, најчешће је неопходно истицање ивица и поправка контраста. У литератури је ова група метода позната као методе за истицање. Треба истаћи да се поправком квалитета слике не повећава информациони садржај слике. Ипак, поправка квалитета слике омогућава посматрачу да лакше уочи неке карактеристике.

Најважније методе за поправку квалитета слике обухватају трансформације нивоа сивог, трансформације контраста, истицање ивица, увећање слике, корекцију шума, бојење слике и др. Већина ових метода је емпиријског карактера и итеративне природе. Према начину обраде, методе за поправку квалитета слике се могу поделити у три групе:

1. локалне операције над појединачним пикселима,
2. просторне операције над групом пиксела,
3. трансформационе технике.

5.1. Локалне операције побољшања квалитета слике над појединачним пикселима

Локалне операције над појединачним пикселима представљају ниво сивог пиксела из оригиналне слике у нови ниво сивог, а може се представити изразом [1]:

$$v = f(u) \quad (5.1)$$

Израз (5.1) може бити дат и математичким изразом, таблично, графички или на неки други начин. Обично се захтева да израз, трансформација, (5.1) задовољава следеће изразе [1]:

1. функција $f(u)$ треба да буде једнозначно и монотонно растућа функција променљиве u ,
2. ако $u \in [0, \max]$, онда и $v \in [0, \max]$.

Први услов је неопходан због очувања редоследа нивоа скале сивог, док други услов обезбеђује да се пресликавањем задржава исти опсег скале сивог. Ипак, задовољавање оба услова није неопходно, јер постоје корисна пресликавања код којих није задовољен неки од ова два услова. Иако се трансформација (5.1) изводи над сваким пикселем слике

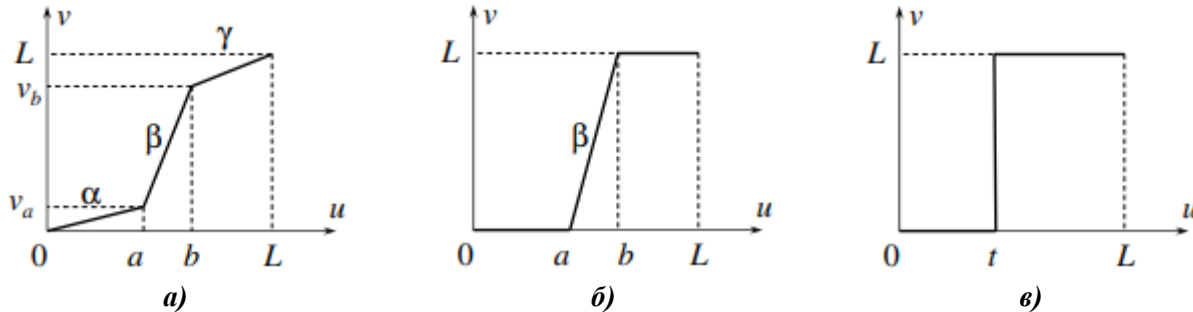
засебно, код сложенијих метода пре сваке трансформације прво мора израчунати хистограм слике.

Код процеса снимања слике дешава се да због неадекватне осветљености сцене или малог динамичког опсега камере, добије слика ниског контраста. Како би се побољшао субјективни квалитет слике може се применити операција развлачења контраста, а може се представити изразом [1]:

$$v = \begin{cases} \alpha u, & 0 \leq u < a \\ \beta(u - a) + v_a, & a \leq u < b \\ \gamma(u - b) + v_b, & b \leq u \leq L - 1 \end{cases} \quad (5.2)$$

Константе a и b се бирају експериментално или на основу познате статистике слике, док за параметре α , β и γ важе ограничења $\alpha, \gamma < 1$ и $\beta > 1$. Област нивоа сивог који се најчешће појављује у слици, $a \leq u < b$, растеже се на област $v_a \leq v < v_b$ чиме се побољшава визуелни утисак. Трансформација (5.2) приказана је на слици 5.1а.

Још један случај развлачења контраста настаје када први и трећи сегмент хоризонтални, тј. $\alpha = \gamma = 0$, слика 5.1б. овај начин трансформације који се назива одсецање је најпогоднији за редукцију шума, када је познато да се вредности нивоа сивог улазног сигнала налазе само у опсегу $[a, b]$. Уколико је код поступка одсецања поред $\alpha = \gamma = 0$, истовремено и $a = b = t$, као на слици 5.1в, израз постаје бинаран, а такав поступак бинаризације назива се поређење са прагом.



Слика 5.1. Трансформација контраста: а) развлачење, б) одсецање, в) поређење с прагом [12]

На слици 5.2б, приказан је поступак растезања контраста на слици „Тифани“, која је у овом случају сувише светла. Растезање контраста обављено је са параметрима $\alpha = 110$, $v_a = 20$, $b = 230$, $v_b = 240$, па се тако добија повољнији визуелни ефекат.

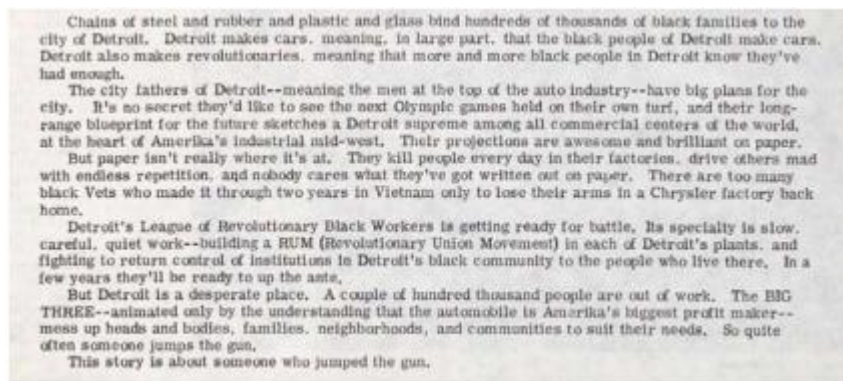
Поступак поређења са прагом је нарочито погодан за обраду слике штампаног текста снимљеног камером или скенером, где се због шума и варијација у осветљењу губи бинарни карактер слике. Поступак поређења са прагом, примењен на слику „текст“, приказан је на слици 5.3б.



а)

б)

Слика 5.2. а) оригинална слика „Тифани“, б) слика после развлачења контраста [11]



а)

Chains of steel and rubber and plastic and glass bind hundreds of thousands of black families to the city of Detroit. Detroit makes cars. meaning, in large part, that the black people of Detroit make cars. Detroit also makes revolutionaries. meaning that more and more black people in Detroit know they've had enough.

The city fathers of Detroit--meaning the men at the top of the auto industry--have big plans for the city. It's no secret they'd like to see the next Olympic games held on their own turf, and their long-range blueprint for the future sketches a Detroit supreme among all commercial centers of the world, at the heart of Amerika's industrial mid-west. Their projections are awesome and brilliant on paper.

But paper isn't really where it's at. They kill people every day in their factories, drive others mad with endless repetition, and nobody cares what they've got written out on paper. There are too many black Vets who made it through two years in Vietnam only to lose their arms in a Chrysler factory back home.

Detroit's League of Revolutionary Black Workers is getting ready for battle. Its specialty is slow, careful, quiet work--building a RUM (Revolutionary Union Movement) in each of Detroit's plants, and fighting to return control of institutions in Detroit's black community to the people who live there. In a few years they'll be ready to up the ante.

But Detroit is a desperate place. A couple of hundred thousand people are out of work. The BIG THREE--animated only by the understanding that the automobile is Amerika's biggest profit maker--mess up heads and bodies, families, neighborhoods, and communities to suit their needs. So quite often someone jumps the gun.

This story is about someone who jumped the gun.

б)

Слика 5.3. а) оригинална слика „текст“, б) слика после поређења са прагом [11]

Када је реч о дигиталном негативу слике он се једноставно може добити у обради медицинских слика, као и у припреми за израду негатива фотографија. На слици 5.4, приказан је пример дигиталног негатива слике „Лена“. Негатив дигиталне слике може се једноставно добити инверзијом нивоа сивог према једначини [1]:

$$v = L - 1 - u \quad (5.3)$$



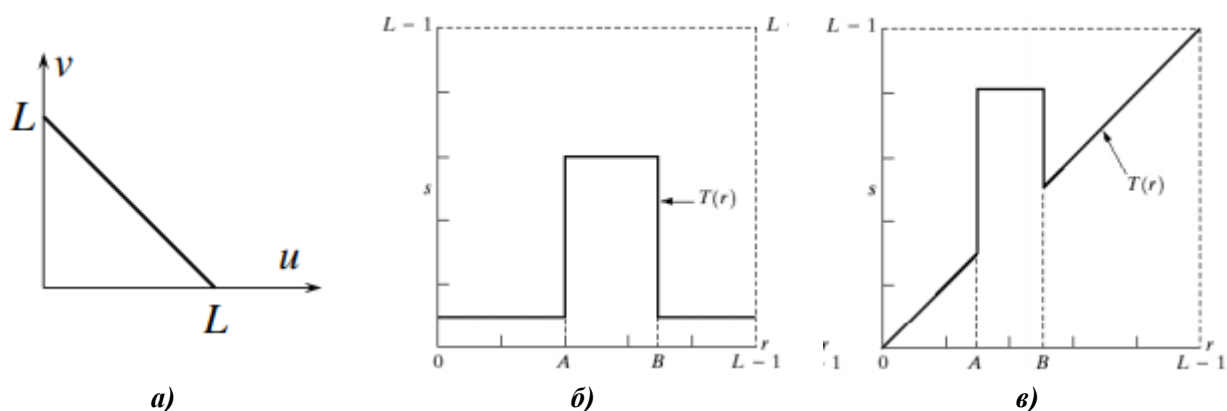
Слика 5.4. Слика „Лена“ а) оригинал, б) негатив [13]

Издавање региона задате сјајности примењује се за једноставну сегментацију слике, јер се пиксели чији је интензитет унутар задатог опсега издвајају од остатка слике. Издавање се може извршити елиминацијом позадине, а према изразу (слика 5.5а) [1]:

$$v = \begin{cases} L - 1, & a \leq u < b \\ 0 & \text{другде} \end{cases} \quad (5.4)$$

Израз (5.4), графички је приказан на слици 5.5б. издавање региона са задржавањем позадине врши се према изразу 5.5, (слика 5.5в) [1]:

$$v = \begin{cases} L - 1, & a \leq u < b \\ u & \text{другде} \end{cases} \quad (5.5)$$



Слика 5.5. Трансформација контраста: а) дигитални негатив, б) издавање региона без позадине, в) издавање региона са позадином [12] [14]

Ако је слика приликом дигитализације униформно квантована са B бита, односно $L = 2^B$ нивоа сивог. Онда се вредност интензитета неког пиксела u , може представити изразом [1]:

$$u = b_{B-1}2^{B-1} + b_{B-2}2^{B-2} + \dots + b_l2^l + b_0 \quad (5.6)$$

Издавање n -тог бита из свих пиксела на слици, односно n -те bit равни, обавља се према изразу [1]:

$$v = \begin{cases} L - 1, & b_n = I \\ 0 & b_u = 0 \end{cases} \quad (5.7)$$

где се вредност n -тог бита може одредити из израза [1]:

$$b_n = \text{Int} \left[\frac{u}{2^n} \right] - 2 \text{Int} \left[\frac{u}{2^{n+1}} \right] \quad (5.8)$$

Примена ове трансформације контраста за одређивање броја бита значајна је за приказ слика на излазном уређају.

Код појединих случајева приликом обраде слике чији је динамички опсег веома велики, па се не може приказати са 8 до 10 бита, колико обично користе излазни уређаји, компресија динамичког опсега се најчешће врши логаритамском трансформацијом [1]:

$$v = c \log(1 + |u|) \quad (5.9)$$

где је c константа која обезбеђује испуњење услова $v \in [0, L - 1]$.

Овом трансформацијом истичу се нижи нивои сивог у поређењу са нивоима велике вредности, а задржава се вредност $v = 0$ за $u = 0$. Корисна је још за приказивање резултата разних унитарних трансформација.

Побољшање квалитета слике се може остварити и трансформацијом интезитета пиксела слике, тако да хистограм обрађене слике има неки унапред одређен облик. Оваком трансформацијом се може добити бољи квалитет слике него једноставнијим методама.

Нпр. претпоставимо да се ради једноставнијег извођења да су интезитети оригиналне и обрађене слике, u и v , континуалне случајне променљиве $u, v \in [0, 1]$. Нека су њихове густине вероватноће $p_u(u)$ и $p_v(v)$. Познато је из теорије вероватноће да се функција $p_v(v)$ може одредити на основу познатих функција $p_u(u)$ и $v = f(u)$, и то [1]:

$$p_v(v) = \left[p_u(u) \frac{d_u}{d_v} \right]_{u=f^{-1}(v)} \quad (5.10)$$

Технике за побољшање квалитета слике су углавном базиране на уобличавању хистограма, а захтевају постојање диференцијабилне функције $u = f^{-1}(v)$. На пример [1]:

$$v = f(u) = \int_0^u p_u(z) dz \quad (5.11)$$

где је: z интеграциона променљива. Десна страна једначине (5.11) представља кумулативну функцију расподеле случајне променљиве u . Тако се заменом једначине (5.11) у једначину (5.10) добија [1]:

$$p_v(v) = \left[p_u(u) \frac{1}{p_u(u)} \right]_{u=f^{-1}(v)} = 1 \quad (5.12)$$

Односно, резултат је независан од инверзне функције трансформације. Користећи за трансформациону функцију једначину (5.1) и кумулативну функцију расподеле променљиве u , добија се слика чији ниво сивог има униформну расподелу. Овим се повећава динамички опсег и поправља субјективни квалитет слике.

5.2. Просторне операције над групом пиксела

Када је реч о просторним операцијама које се примењују за побољшање квалитета слике у поступак израчунавања вредности једног пиксела уводи се и група пиксела која га окружује, а која се назива „локално суседство“. Просторне операције се често изводе конволуцијом слике (математички оператор који од две функције производи трећу) и коначног импулсног одзива филтра који се назива „просторна маска“. У зависности од облика и садржаја просторне маске операције могу бити различите и могу имати велики број намена.

Просторно усредњавање се одвија заменом вредности сваког пиксела са тежинском средњом вредношћу локалног суседства тог пиксела, тј. [1]:

$$y[m, n] = \sum_{k, l \in S} w[k, l] x[m - k, n - l] \quad (5.13)$$

где S представља скуп координата тачака које припадају локалном суседству, а $w[k, l]$ су одбирци импулсног одзива 2D FIR (*Finite Impulse Response* – коначни импулсни одзив) филтра или елементи матрице који представља просторну маску. Просторне маске су најчешће квадратног облика са непарним бројем елемената. Неке од чешће примењиваних просторних маски приказане су, као матрице, слика 5.6.

$$\begin{array}{ccccc} \frac{1}{4} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} & \frac{1}{9} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} & \frac{1}{8} \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} & \frac{1}{10} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} & \frac{1}{16} \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \\ \text{а)} & \text{б)} & \text{в)} & \text{г)} & \text{е)} \end{array}$$

Слика 5.6. Пример просторних маски за усредњавање [1]

Усредњавање се користи код уклањања шума са слике. Ако је сваком пикселу слике $x[m, n]$ придодат адитивни шум $e[m, n]$, тј. [1]

$$x'[m, n] = x[m, n] + e[m, n] \quad (5.14)$$

Када се примени тежинско уредњавање према једначини (5.13) са квадратном маском, која при том има N_S елемената једнаких јединици (слика 5.6б, $N_S = 9$), тада следи [1]:

$$y[m, n] = \frac{1}{N_S} \sum_k \sum_l w[k, l] x'[m - k, n - l] = \frac{1}{N_S} \sum_k \sum_l w[k, l] x'[m - k, n - l] + \bar{e}[m, n] \quad (5.15)$$

где је $\bar{e}[m, n]$ просторно уредњен шум $e[m, n]$. Ако је $e[m, n]$ бели шум са средњом вредношћу 0 и варијансом σ_e^2 , тада $\bar{e}[m, n]$ има средњу вредност једнаку 0 и варијансу [1]:

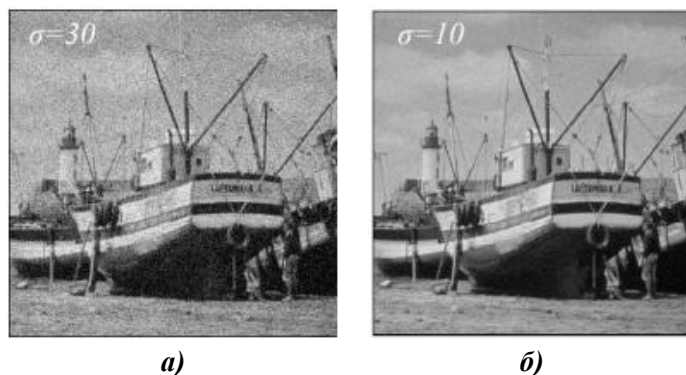
$$\sigma_{\bar{e}}^2 = \sigma_e^2 / N_S \quad (5.16)$$

Уочавамо да је варијанса мања онолико пута колико је број пиксела у масци, слика 5.7.



Слика 5.7. Тежине распоређење по Гаусовој функцији стандардне девијације сигма [11]

На слици 5.8, приказано је уклањање Гаусовог шума са слике. Тачније приказана је слика Брод деградирана адитивним Гаусовим шумом чија је варијанса $\sigma_e = 30$, па је вршни однос сигнал/шум $\text{PSNR} = 22,1$ [dB]. Када се примени поступак просторног усредњавања, применом маске са слике 5.6в, добијамо слику 5.8б, при којој је утицај шума знатно умањен, јер је $\text{PSNR} = 26,9$ [dB], а чији је субјективни квалитет добар [15].

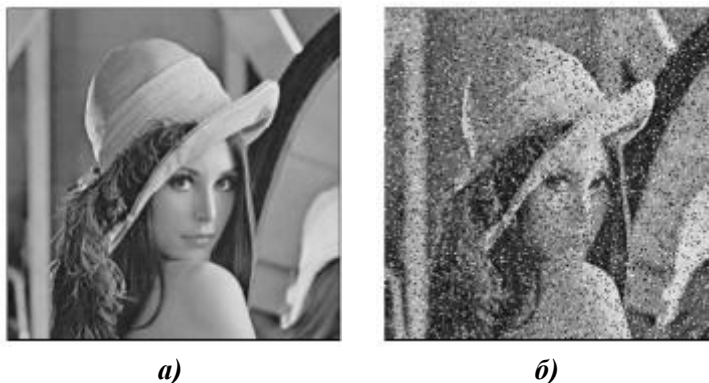


Слика 5.8. а) слика „Брод“ са Гаусовим шумом, б) слика после просторног усредњавања са маском са слике 5.6в [15]

Просторно усредњавање има и своју негативну страну, јер се усредњавањем губи оштрина слике, па се општи прелази ивице ублажавају. Овај ефекат се може ублажити изменом (модификацијом) процеса усредњавања. За сваки пиксел се одреди усредњена вредност према (5.15) да би се применио следећи критеријум замене [1]:

$$z[m, n] = \begin{cases} y[m, n], & |y[m, n] - x'[m, n]| > T \\ x'[m, n], & \text{другде} \end{cases} \quad (5.17)$$

У модификованом поступку усредњавања замењују се само оне вредности пиксела које су знатно промењене утицајем шума. У пракси је овај поступак погоднији за редукцију шума када треба задржати ивице слике. Усредњавање је погодно за уклањање Гаусовог шума, када интензитет шума није претерано велики. У случају када је интензитет шума изузетно велики (типа „со“ или „бибер“, слика 5.9) усредњавањем се знатно мењају и вредности пиксела које нису промењене шумом, чиме се квари и субјективни квалитет слике.



Слика 5.9. а) оригинална тест слика „Лена“, б) слика оштећена са 30% импулсног шума типа „со“ и „бибер“ [15]

Недостатак поступка усредњавања јесте деградација ивица, а ако локално суседство има облик издуженог правоугаоника, тада резултат усредњавања зависи и од оријентације просторне маске. Према томе, у изразу (5.13) се појављује још један параметар, а то је оријентација просторне маске θ , односно [1]:

$$y[m, n, \theta] = \frac{1}{N_\theta} \sum_{k,l} w[k, l] x[m - k, n - l] \quad (5.18)$$

где је N_θ број пиксела у маски. За сваки пиксел се изврши усредњавање у неколико праваца θ , а затим се одреди оптимална вредност угла θ_{opt} за који је разлика $|y[m, n, \theta] - x[m, n]|$ минимална. Тада се филтрирана слика $z[m, n]$ добија као [1]:

$$z[m, n] = v[m, n, \theta_{opt}] \quad (5.19)$$

За умерено усредњавање најчешће се примењују оријентације $\theta = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$, јер се за остале оријентације тешко може формирати погодна просторна маска.

Изоштравањем слике унапређује се визуелни утисак посматрача, тако што се истичу ивице на слици. Изоштравање се може постићи истицањем високих учестаности у спектру слике, али и методама у просторном домену које имају исти ефекат. Једна од група метода за изоштравање слике заснива се на примени апроксимације градијента који представља извод функције слике и носи информације о ивицама. Другу групу метода, чине методе које потичу из фотографије и штампарске индустрије, а то је маскирање „неоштрих“ делова одузимањем слике добијене нискофреквентним филтрирањем од оригиналне слике.

Градијент неке континуалне функције две променљиве $f(x, y)$ дефинисан је колона вектором [1]:

$$G[f(x, y)] = \nabla f(x, y) = \left[\frac{\partial f}{\partial x} \frac{\partial f}{\partial y} \right]^T \quad (5.20)$$

Према томе, градијент је вектор који показује смер максималне брзине промене функције $f(x, y)$. Модул градијента представља скаларну функцију и дефинисан је изразом [1]:

$$G(x, y) = G[f(x, y)] = \left[\left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (5.21)$$

Код дигиталне обраде слике координате се представљају целим бројевима, тако да се градијент и модул градијента морају апроксимирати. На пример [1]:

$$G[m, n] \approx \{(f[m, n] - f[m + 1, n])^2 + (f[m, n] - f[m, n + 1])^2\}^{1/2} \quad (5.22)$$

или користећи апсолутне вредности [1] :

$$G[m, n] \approx |f[m, n] - f[m + 1, n]| + |f[m, n] - f[m, n + 1]| \quad (5.23)$$

Друга апроксимација модула градијента, а која се често примењује у пракси је Робертсова апроксимација која је дефинисана изразом [1]:

$$G[m, n] \approx \{(f[m, n] - f[m + 1, n + 1])^2 + (f[m + 1, n] - f[m, n + 1])^2\}^{1/2} \quad (5.24)$$

или користећи апсолутне вредности [1]:

$$G[m, n] \approx |f[m, n] - f[m + 1, n + 1]| + |f[m + 1, n] - f[m, n + 1]| \quad (5.25)$$

Ако се изабере одговарајућа апроксимација градијента, онда се изоштравање слике $f[m, n]$ врши сабирањем скаларне вредности градијента са пикселом оригиналне слике на истој позицији, тј. [1]

$$y[m, n] = f[m, n] + \alpha G[m, n] \quad (5.26)$$

где је $\alpha > 0$ тежински фактор.

Изоштравање слике може се извршити и ако се од слике одузме њена верзија добијена нискофректентним филтрирањем. Ако се са $f_{LP}[m, n]$ означи слика добијена после филтрирања оригиналне слике $f[m, n]$, онда се поступак изоштравања може приказати следећим изразом [1]:

$$y[m, n] = \alpha f[m, n] - \beta f_{LP}[m, n] \quad (5.27)$$

где су α и β позитивни скалари, а $\alpha > \beta$.

Из израза (5.27) јасно се уочава да се оваквим одузимањем истичу високофректентне компоненте у спектру слике и да овај начин изоштравања представља неку врсту високофректентног филтрирања слике у просторном домену. Импулсни одзив еквивалентног филтра пропусника високих фректенција може се добити из импулсног одзива нискофректентног филтра, као [1]:

$$h_{HP}[m, n] = \alpha f[m, n] - \beta h_{LP}[m, n] \quad (5.28)$$

Импулсни одзив еквивалентног филтра пропусника високих фректенција мора да задовољи одређене услове, а од којих је најважније очување средње вредности интезитета слике. Како би овај услов био задовољен неопходно је изабрати константе α и β тако да збир свих чланова импулног одзива буде једнак јединици. Неки типични примери матрица импулног одзива који се користе за изоштравање приказани су на слици 5.10, а на слици 5.11, приказан је резултат изоштравања слике истицањем високих учестаности.

$$\begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 5 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -2 & 1 \\ -2 & 5 & -2 \\ 1 & -2 & 1 \end{bmatrix} \\ \frac{1}{7} \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ -2 & 19 & -2 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix}$$

Слика 5.10. Примери просторних маски за изоштравање слике [16]



Слика 5.11. Примери изоштравања слике истицањем високих учестаности [16]

Високофреквентним филтрирањем слике могу се добити интензитети пиксела одређене слике који не леже у одређеном опсегу од 0 до $L-1$. Са овим пикселима може се поступити на два начина, и то:

1. може се извршити једноставно одсецање чиме се негативне вредности пиксела своде на нулу, а оне које су веће од максималне вредности на $L-1$.
2. може се извршити скалирање вредности пиксела да би свеле опсег од 0 до $L-1$.

Изоштравањем слике се може и покварити њен квалитет. Ово се углавном дешава када оригинална слика садржи шум. Како шум има широкопојасни, а често и високофреквентни карактер, изоштравањем се утицај шума још више појачава чиме се квари квалитет слике.

Некада се ради изоштравања слике уз смањивање утицаја шума, примењују филтри пропусници опсега. Импулсни одзив филтра пропусника опсега учестаности може се дати следећим изразом [1]:

$$h_{BP}[m, n] = \alpha h_{LP1}[m, n] - \beta h_{LP2}[m, n] \quad (5.29)$$

где је $\alpha h_{LP1}[m, n]$ и $\beta h_{LP2}[m, n]$ представљају импулсне одзиве два нискофреквентна филтра различитих граничних учестаности.

У већини случајева неопходно је слику или један мањи део слике повећати ради приказивања на монитору. Овај поступак се назива увећање (зумирање) или просторна интерполација слике. Најједноставнији метод просторне интерполације представља репликација (понављање) пиксела. Код овог начина интерполације сваки пиксел дуж линије се понавља још једном, а свака тако добијена линија се, такође, понавља.

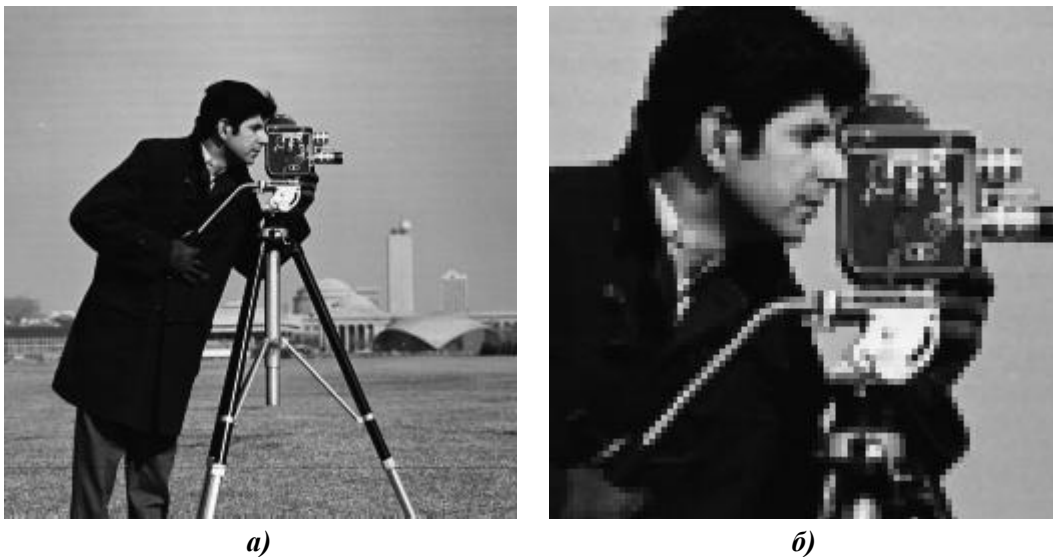
На тај начин се добије степен повећања од два пута дуж сваке координатне осе, тј. број пиксела у слици се повећава четири пута. Поступак увећања слике понављањем пиксела може се математички описати помоћу следећег израза [1]:

$$y[m, n] = x[k, l]; k = \text{Int} \left[\frac{m}{2} \right]; l = \text{Int} \left[\frac{n}{2} \right]; 0 \leq m \leq 2M - 1; 0 \leq n \leq 2N - 1 \quad (5.30)$$

Поступак увећања слике понављањем пиксела може се описати и помоћу конволуције. И то, када се из оригиналне слике $x(k, l)$, димензије $M \times N$, генерише нова слика $w(m, n)$, димензија $2M \times 2N$, убацивањем врста које садрже само нуле између сваке две оригиналне колоне. После тога се изврши конволуција тако добијене проширене слике $w[m, n]$ са матрицом H , која је дефинисана као [1]:

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.31)$$

Недостатак ове методе увећања слике репликацијом је што се на дијагоналним ивицама уочава блоковска структура, нарочито у случају ако је степен интерполације већи од два. Увећање слике репликацијом пиксела приказано је на слици 5.12.



Слика 5.12. Увећање слике репликацијом: а) оригинална слика, б) део слике увећан 3x [17]

Нешто бољи резултати добијају се применом линеарне (или билинерне) интерполације, где се уводи претпоставка линеарне зависности интензитета између два суседна пиксела у истој врсти или колони. Нпр. код интерполације 2×2 , линеарном интерполацијом по врстама се добија да је [1]:

$$\begin{aligned} z[m, 2n] &= x[m, n]; \quad 0 \leq m \leq M-1; \quad 0 \leq n \leq N-1 \\ z[m, 2n+1] &= 0.5(x[m, n] + x[m, n+1]); \quad 0 \leq m \leq M-1; \quad 0 \leq n \leq N-1 \end{aligned} \quad (5.32)$$

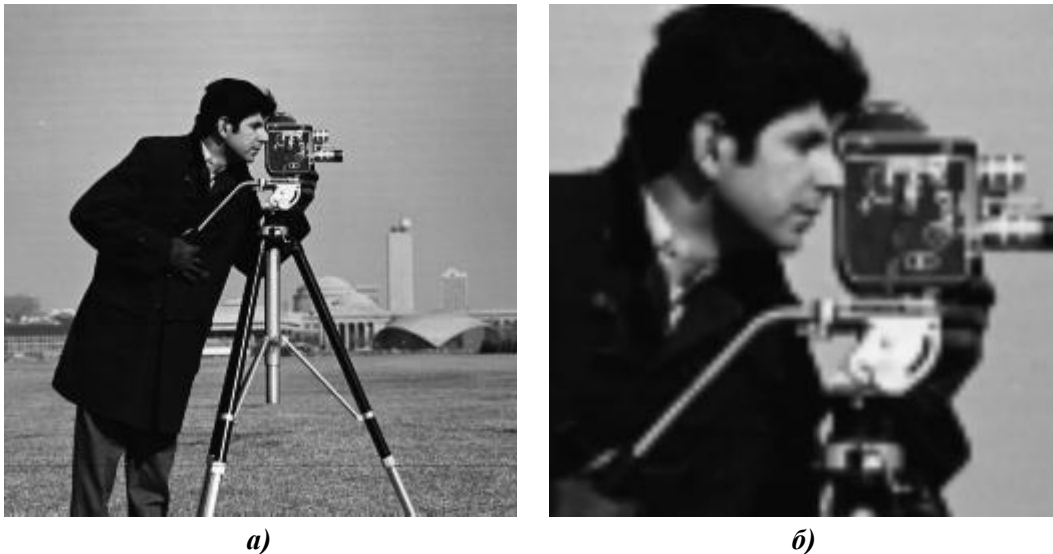
А линеарном интерполацијом по колонама се добија [1]:

$$\begin{aligned} y[2m, n] &= z[m, n]; \quad 0 \leq m \leq M-1; \quad 0 \leq n \leq 2N-1 \\ y[2m+1, n] &= 0.5(z[m, n] + z[m+1, n]); \quad 0 \leq m \leq M-1; \quad 0 \leq n \leq 2N-1 \end{aligned} \quad (5.33)$$

при чему се сматра да су елементи улазне слике једнаки нули ако је индекс врсте већи од $M-1$ или индекс колоне већи од $N-1$. Исти резултат може се добити конволуцијом слике проширене са нултим врстама и колонама, $w[m, n]$, са матрицом H која добија облик [1]:

$$H = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.34)$$

У већини случајева линеарна интерполација даје задовољавајуће резултате, нарочито у поређењу са методом увећања репликацијом пиксела. Увећање слике линеарном интерполацијом приказано је на слици 5.13.



Слика 5.13. Увећање слике линеарном интерполацијом: а) оригинална слика, б) део слике увећан $3x$ [17]

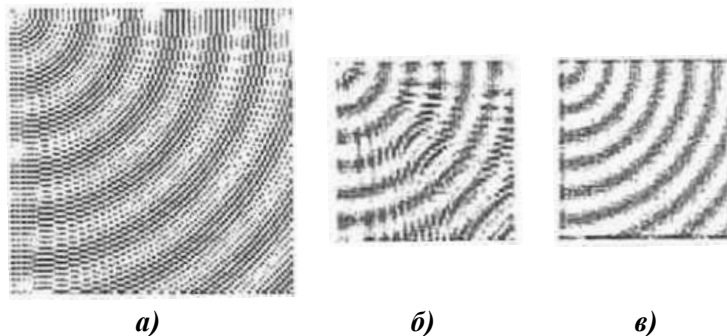
Ако је неопходно извршити фактор увећања већи од два пута, нпр. $p+1$, где је $p > 1$, примењује се измењени модел. Тако што се формира проширена матрица уметањем p

нултих врста и p нултих колона између сваке две врсте и колоне оригиналне слике. Потом се изврши p узастопних конволуција са матрицом H из (5.34). оваква интерполација назива се „сплајн“ интерполација p -тог реда (интерполент специјалан). Интерполација вишег реда има предност у односу на линеарну интерполацију. Нпр. интерполацијом вишег реда чува се „глаткост“ промена интензитета, као и редукција шума услед процеса усредњавања.

Често је неопходно да слику већих димензија смањити, ради умањења захтева за меморијом приказа на монитору или штампања. Овај поступак назива се „децимација“ слике (смањивање). Познато је да смањењем броја пиксела по једној врсти или колони за N пута једнако смањењу учестаности одабирања по одговарајућој оси за N пута и може се извршити задржавањем сваког N -тог пиксела у врсти и колони.

Ипак, као резултат овог поступка децимације слике могу се појавити разна изобличења, које су последице тога да нове учестаности одабирања не задовољавају теорему одабирања. Према томе, пре процеса извођења децимације неопходно је извршити нискофреквентно филтрирање филтером чије су граничне учестаности мање од оригиналних учестаности одабирања по обе осе за минимум $2N$ пута. Нискофреквентни филтар који се најчешће користи представља релативно једноставан поступак усредњавања којим се групом од 2×2 пиксела замењује једним пикселом чији је интензитет једнак средњој вредности интензитета групе пиксела [1]. Сlike са израженојим високофреквентним садржајем, често се филтрирају 2D филтаром, који има бољу селективност. 2D FIR филтри се највише корист у пракси, јер се филтрирање обавља конволуцијом филтра и слике у просторном домену.

На слици 5.14, приказана је илустрација изобличења слике. Слика 5.14а, представља тест слику, односно супер-позицију две синусоидалне промене интензитета различитих учестаности. На слици 5.14б, приказан је резултат поступка децимације без претходног филтрирања, а на слици 5.14в резултат поступка децимације са претходним филтрирањем. Са овог примера се јасно може уочити неопходност претходног филтрирања слике пре спровођења поступка децимације.

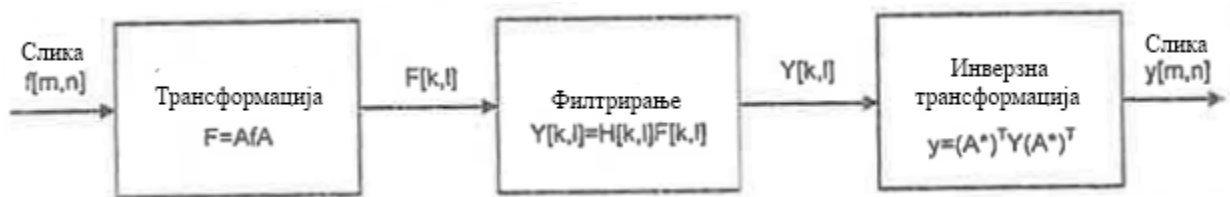


Слика 5.14. а) тест слика, б) резултат децимације без филтрирања, в) резултат децимације са филтрирањем [1]

5.3. Трансформационе технике

Поједине трансформације слике успешније се спроводе у трансформационом домену. То је нарочито случај са операцијама филтрирања, код којих се преласком на фреквенцијски домен помоћу Фуријеове трансформације прецизније може описати поступак филтрирања [1]. Блок дијаграм поступака обраде слике у трансформационом домену приказан је на слици 5.15. као трансформација слике најчешће се користи 2D Фуријеова дискретна трансформација. Из разлога појединих погодности могу се користити и друге трансформације. Поступци обраде у трансформационом домену бити:

- линеарни и
- нелинеарни.



Слика 5.15. Блок дијаграм поступка обраде у трансформационом домену [1]

Промена фреквенцијског садржаја слике може се извршити множењем 2D трансформације слике $F[k, l]$ са функцијом преноса линеарног филтра $H[k, l]$, односно [1]:

$$Y[k, l] = H[k, l]F[k, l] \quad (5.35)$$

Инверзном трансформацијом функције $Y[k, l]$ добија се жељена обрађена слика $y[m, n]$. Ако се као трансформација користи DTF, онда се функција преноса $H[k, l]$ најчешће дефинише тако да не утиче на фазну карактеристику спектра слике, односно филтарска функција има фазу једнаку нули. Код осталих трансформација функција преноса $H[k, l]$ мора бити реална.

Филтрирање слике могуће је извести и у фреквенцијском домену, користећи Фуријеову трансформацију. Први корак је проналажење Фуријеове трансформације импулсног одзива филтра и улазне слике. Затим се изврши множење у фреквенцијском домену, да би се на крају инверзном Фуријеовом трансформацијом добила филтрирана слика [19]:

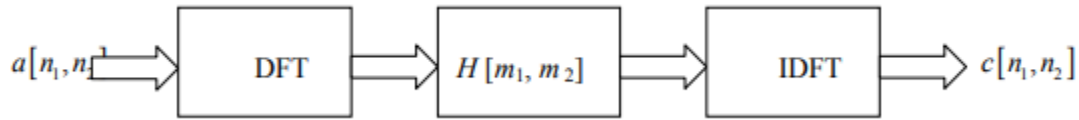
$$1. \text{ израчунати } A[m_1, m_2] = F\{a[n_1, n_2]\} \quad (5.36)$$

$$2. \text{ помножити } A[m_1, m_2] \text{ са унапред одређеном } H[m_1, m_2] = h\{a[m_1, m_2]\} \quad (5.37)$$

$$3. \text{ израчунати резултат } c[n_1, n_2] = F^{-1}\{A[m_1, m_2] \cdot H[m_1, m_2]\} \quad (5.38)$$

Треба напоменути да се одређивање Фуријеове трансформације импулсног одзива ради само једном за све слике које се филтрирају истим филтром. На слици 5.16, шематски је

приказана наведена процедура. У пракси се користе нископропусни филтри за уклањање шума, а високопропусни за наглашавање брзих промена на слици.



Слика 5.16. Филтрирање у фреквенцијском домену [18]

Најједноставнију филтарску функцију нискофреквентног типа представља идеалан нискофреквентни филтар, а дефинисан је изразом [1]:

$$H[k, l] = \begin{cases} 1, & k^2 + l^2 \leq r^2 \\ 0, & k^2 + l^2 > r^2 \end{cases} \quad (5.39)$$

Ако се као трансформација користи DTF, онда израз (5.39) дефинише функцију преноса $H[k, l]$ само у опсегу $0 \leq k, l \leq N/2 - 1$, док је у преосталим деловима фреквенцијске равни функција преноса дефинисана правилима радијалне симетрије [1]:

$$H[k, l] = \begin{cases} H[k, N - 1 - l], & 0 \leq k \leq N/2 - 1, & N/2 \leq l \leq N - 1 \\ H[N - 1 - k, l], & N/2 \leq k \leq N - 1, & 0 \leq l \leq N/2 - 1 \\ H[N - 1 - k, N - 1 - l], & N/2 \leq k, l \leq N - 1 \end{cases} \quad (5.40)$$

Ако се уместо DTF користи нека друга унитарна трансформација, тада израз (5.40) дефинише функцију преноса у целој фреквенцијској равни, односно за $0 \leq k, l \leq N - 1$.

6. Закључак

Обрада дигиталне слике представља веома сложен и нумерички захтеван процес. За обраду дигиталне слике могу се користити стандардни РС рачунари, док се за обраду и пренос сликеу реалном времену користе специјализовани склопови са дигиталним сигналним процесорима, мултипроцесорским и дистрибутивним системима, као и специјализованим архитектурама за обраду слика.

Такође, израз дигитална обрада слике важи и за обраду других дводимензионалних података, а као излазни резултат добија се нова обрађена слика спремна да се прикаже на монитору. Излазни подаци могу бити приказани и у облику фотографије или филма, а врло често и као неки нумерички подаци у обрађеној слици.

Увођењем савремених елемената технике за обраду слике знатно је скраћен процес обраде или преноса слике, а њиме је знатно поправљен и квалитет слике. Ово је омогућено развојем електронике и рачунарске технике, односно рачунарских компоненти попут микропроцесора и дигиталних процесора сигнала.

Како је обрада дигиталне слике поступак измене детаља на некој дигиталној фотографији за ту сврху се користе посебни програми. То могу бити векторски и растерски графички софтвери који служе као алат за измену, побољшавање и размену слике. Савремене технике дигиталне обраде слике своју примену највише налазе код свемирских програма, инжењерству, медицини, форензици и другим областима.

Данас постоји низ метода за обраду слике, где се ради о побољшању слике за људску интерпретацију. Савремене методе за обраду слике могуће је применити у свим подручјима где се информација може приказати сликом, односно волуменом. Неке од метода које ће у будућности имати значајну примену у овој области су: псеудоколорирање слика за бољу видљивост, реконструкција слика из пројекција, регистрација слика и др.

Литература:

- [1] Поповић М.: Дигитална обрада слике, Електротехнички факултет у Београду, 2006.
- [2] Компресија слике, алгоритми и формати, PNG формат:
<http://www.am.unze.ba/pzi/2010/BarucijaLejla/png.html>, приступљено 4.4.2020.
- [3] Хајба М., Компресија слике – Walvet (valić) трансформација, Хрватски математички електронски часопис, преузето са: <http://e.math.hr/category/klju-ne-rije-i/kompresija-slike>, приступљено 29.2.2020.
- [4] Цветковић Д., Физички параметри радне и животне стедине – Оптичко зрачење, Интернет презентација, Факултет заштите на раду, Ниш, 2020.
- [5] Дигитална обрада слике, Час 2 – перцепција светлости, колор системи, Универзитет у Београду, Електротехнички факултет, 2016.- 2017. Интернет презентација:
http://tnt.etf.bg.ac.rs/~oe4dos/Vezbe/oe4dos_cas2.pdf, приступљено 1.4.2020.
- [6] Color theory, Negative after image - Color Exercise Interaction:
<https://saranvargas.wordpress.com/tag/negative-after-image/>, приступљено 4.4.2020.
- [7] Modulation Transfer Function Tests, MTF Equation:
<https://mtftests.wordpress.com/theoretical-overview/mtf-definition/>, приступљено 12.4.2020.
- [8] Fox A., Why Do Printers Use CMYK Ink Instead of RGB?:
<https://www.maketecheasier.com/why-printer-use-cmyk/>, приступљено 12.4.2020.
- [9] Дигитална слика – интернет презентација, Електротехнички факултет Бања Лука, новембар 2015., преузета са: http://dsp.etfbl.net/multimediji/2017/09_slika.pdf, приступљено 11.4.2020.
- [10] Spaepen P., De Boedt S., Marie Aerts J., Vander Sloten J., Digital Image Processing of Live/Dead Staining, *Methods and Protocols*, Methods in Molecular Biology, vol. 740, DOI 10.1007/978-1-61779-108-6_21, © Springer Science+Business Media, LLC 2011
- [11] Дигитална обрада слике – Час 3. - побољшање квалитета слике, операције над појединачним пикселима, просторне операције над групом пиксела, Интернет презентација: http://tnt.etf.bg.ac.rs/~oe4dos/Vezbe/oe4dos_cas3.pdf, Електротехнички факултет, Београд 2016/2017.
- [12] Лончарић С., Побољшање слике у просторној домени, Интернет презентација:
<https://www.fer.unizg.hr/download/repository/06-OI-PoboljsanjeSlike.pdf>, приступљено 20.4..2020.
- [13] Digital Image Processing, Matlab code to get negative of an image: <http://digital-image-processing-svu.blogspot.com/2012/05/matlab-code-to-get-negative-of-image.html>, приступљено 21.4.2020.

- [14] Црнојевић В., Дигитална обрада слике – Побољшање слике у просторном домену (поглавље 3), Интернет презентација:
<https://people.vts.su.ac.rs/~pmiki/STOREnGO/DIP/Poglavlje%203%20-%20Poboljsanje%20slike%20u%20prostornom%20domenu.pdf>, Факултет техничких наука, Нови Сад 2008.
- [15] Црнојевић В., Дигитална обрада слике – Рестаурација слике (поглавље 5), Интернет презентација:
<https://people.vts.su.ac.rs/~pmiki/DIP/s05%20-%20Restauracija%20slike.pdf>, Факултет техничких наука, Нови Сад 2008.
- [16] Дигитална обрада слике – Побољшање квалитета слике, операције над појединачним пикселима, просторне операције над групом пиксела, Интернет презентација:
<http://tnt.etf.bg.ac.rs/~oe4dos/Vezbe/Poboljsanje%20kvaliteta%20slike.pdf>, Електротехнички факултет, Београд 2015/2016.
- [17] Geometric Scaling, Guidelines for Use:
<https://homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/HIPR2/scale.htm>, приступљено 28.6.2020.
- [18] Дигитална обрада слике – Филтрирање у фреквенцијском домену:
http://dsp.etfbl.net/multimediji/2017/11_digitalna%20obrada%20slike.pdf, приступљено 25.4.2020.