

## SPEKTRALNE KARAKTERISTIKE VIDEOKAMERA I NJIHOVO USKLAĐIVANJE S PRIMARIMA ZASLONA

### VIDEO CAMERAS SPECTRAL RESPONSIVITY FUNCTIONS AND THEIR MATCHING WITH ANALYSIS FUNCTIONS OF THE DISPLAY PRIMARIES

*Dragan Matković*

Pregledni rad

**Sažetak:** Dobivanje i obrada videosignala u digitalnim videokamerama temelji se na principima trikromatske kolorimetrije. Kolorimetrijski ispravna reprodukcija boja postignuta je ukoliko se boje svjetlosti s elementa iz snimane scene i elementa dobivenih reprodukcijom boja na zaslonima (CRT-Cathode Ray Tube, LCD-Liquid Crystal Display, PDP-Plasma Display Panel) podudaraju u kolorimetrijskom smislu. Kolorimetrijski uvjeti izvode se iz poznavanja načina kako spektralnu gustoću snage izvora svjetlosti (primarnih i sekundarnih) elementa snimane scene preoblikovati u tri komponente sa spektralnim karakteristikama gustoće snage za crvenu, zelenu i plavu svjetlost. Zatim, kako iz dobivenih komponenata prijeći nazad na onakav spektralni sastav svjetlosti, dobiven zračenjem sa zaslona, koji je s kolorimetrijskog stajališta u granicama dopuštenih odstupanja u reprodukciji boja. Tehničko rješenje vjernog prijenosa boja digitalnim videosustavima još od samih početaka razvoja televizije u boji temeljilo se na poznavanju osobina ljudskog vida i razumijevanju fizikalnog procesa snimanja i reprodukcije boja. Jedno od rješenja koje koristi linearnu matricu u obradi signala iz slikovnih senzora prikazano je u ovom članku.

**Ključne riječi:** osobine ljudskog vida, krivulje za miješanje boja, spektralne karakteristike primara zaslona, korekcijska linearna matrica

Review article

**Abstract:** Colour image data captured and processed by digital video cameras are based upon trichromatic properties of human colour vision. Colorimetrically correct analysis to be presented makes the assumption that perfect or ideal analysis will result in a reproduction on a monitor (CRT-Cathode Ray Tube, LCD-Liquid Crystal Display, PDP-Plasma Display Panel) such that the chromaticity coordinates of the displayed colour and the original are the same. The science of colorimetry concerns the relationship between spectral power distribution and three components called tristimulus values that specify a colour. Accurate colour reproduction depends on knowing exactly how the physical spectra of the original scene are transformed into these components, and exactly how the components are transformed to physical spectra at the display. The colour fidelity of a digital video signal source was well known in the early days of colour television and was based on the trichromatic nature of human vision and very subtle and important point about colour capture and reproduction. One of the solutions with substantially improved colour fidelity achieved by a linear matrix included in the signal chain is described in this paper.

**Key words:** fundamentals of vision, colour-matching functions, spectral power distributions (SPD) for display primaries,  $3 \times 3$  linear matrix

## 1. UVOD

Optička slika snimane scene projicira se na slikovne senzore videokamere. Videokamere građene su najčešće s jednim ili tri slikovna senzora. Kod videokamera s jednim slikovnim senzorom koristi se uzorak od četiri filtra ( $2 \times 2$ ) u R-G-G-B kombinaciji koji se periodički ponavlja preko cijele površine slikovnog senzora. Uzorak je poznat pod nazivom Bayerov prema istraživaču Bruce Bayeru (iz tvrtke Kodak) koji ga je izumio 1976. godine. Videokamere s tri slikovna senzora koriste dikroidna zrcala kao filtre koji dolazno svjetlo iz objektivna spektralno rastavljaju na crvenu (R), zelenu (G) i plavu

svjetlost (B). Ove tri obojene svjetlosti su optičke slike snimane scene i projiciraju se svaka na posebni slikovni senzor (CCD-Charge-Coupled Device ili CMOS-Complementary Metal-Oxide-Semiconductor tipa) [1]. Prijenosna spektralna karakteristika u optičkom dijelu kamere zavisi od kvalitete leća, filtarskih karakteristika dikroidnih zrcala (za crvenu, zelenu i plavu svjetlost), filtarskih karakteristika ND (Neutral Density) filtara, filtarskih karakteristika optičkih R,G,B filtara ispred samih slikovnih senzora, spektralne osjetljivosti samih slikovnih senzora i linearne matrice (elektronički sklop) koja se nalazi neposredno iza slikovnog senzora nakon linearne optičko-električne transformacije. Najveći

utjecaj na spektralnu osjetljivost videokamere imaju optički R,G,B filtri i linearna matrica. Ukupna osjetljivost ovih videokamera oko dva puta je veća od onih s jednim slikovnim senzorom.

## 2. SPEKTRALNE KARAKTERISTIKE IZVORA SVJETLOSTI, TRIKROMATSKA OSOBINA VIDA I KRIVULJE ZA MIJEŠANJE BOJA

Boja određene svjetlosti određena je razdiobom gustoće snage zračenja svjetlosnog izvora u ovisnosti od valne duljine svjetlosti. Najčešće se u spektralnim karakteristikama svjetlosti prikazuje ovisnost fizikalne (radiometrijske) veličine gustoće snage zračenja ( $\frac{W}{sr \cdot m^2}$ ) od valne dužine zračenja (svjetlosti). Gustoća snage zračenja (Spectral Power Distribution) naziva se radijancija (slika 1). Radijancija ( $L$ ) odgovara fotometrijskoj (psihofizičkoj) veličini gustoći jakosti svjetlosti ( $L_V$ ).

$$L_V = K_m \cdot \int_{380}^{780} L \cdot V(\lambda) d\lambda$$

$K_m$ - konstanta koja zavisi od jedinica za radijanciju i gustoće jakosti svjetlosti (luminanciju).

$V(\lambda)$ - funkcija relativne osjetljivosti ljudskog oka (krivulja luminoznosti). Predložena od CIE 1924.godine za privremeno korištenje ali je kasnije trajno usvojena.

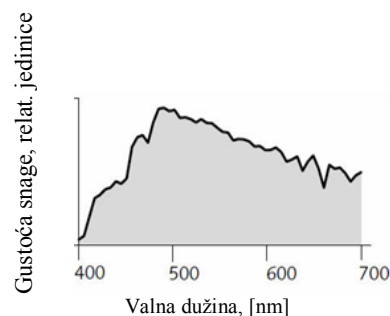
Gustoća jakosti svjetlosti naziva se sjaj ili luminancija, a izražava se u mjernim jedinicama kandelama po kvadratnom metru ( $\frac{cd}{m^2} = nit[nt]$ ).

Jedan od načina da se reproducira boja je reprodukcija njene gustoće snage zračenja (spektralna karakteristika) te se naziva spektralna reprodukcija. Ovaj način vodio bi podjeli valnog područja vidljive svjetlosti od 400nm do 700nm na 31 segment, svaki širine 10nm. Korištenje 31-og podatka za svaki element slike (piksel) bio bi vrlo ne ekonomičan način kodiranja slike. Zahvaljujući trikromatskoj osobini vida te korištenjem odgovarajućih težinskih funkcija (krivulja za miješanje boja), boje snimane scene moguće je izjednačiti s bojama na prikazanoj slici (zaslonu) miješanjem svjetlosnih boja tri svjetlosna izvora (primara), koji su pažljivo odabrani u spektru vidljive svjetlosti u skladu sa značajkama ljudskog vida. Ovaj način reprodukcije boje, uz korištenje 3 podatka za svaki element slike, naziva se tropodražajna reprodukcija.

Kako je za većinu sustava za reprodukciju slike u boji, s tehničkog stajališta, dovoljno koristiti vrijednosti krivulja za miješanje boja standardnog promatrača za svaki 10nm korak od 400nm do 700nm, to znači da je cijela spektralna karakteristika podijeljena na 31 segment. CIE krivulje za miješanje boja dane su tablično posebno za 1nm i za 5nm korak od 380nm do 780nm [2]. Obzirom da je osjetljivost ljudskog oka ispod 400nm i

iznad 700nm svega jedan postotak svoje maksimalne osjetljivosti, uzima se u obzir samo područje od 400nm do 700nm. Znači, za specifikaciju boja nije potrebno specificirati spektralnu karakteristiku (slika 1), već su dovoljnije tri vrijednosti (količine kolorimetrijskih primara) nazvane tropodražajne vrijednosti. Tropodražajne vrijednosti određene su kromatskim koordinatama u kromatskom dijagramu i vrijednošću luminancije. Reprodukciom boja tropodražajnim vrijednostima ostvaruje se izjednačenje boja snimane scene i boja prikazane slike na zaslonu.

Boje na zaslonu su metameri boja u snimanoj sceni. Stupnjem metamerizma određena je veličina razlike između spektralnih karakteristika dvaju boja koje su definirane istim tropodražajnim vrijednostima. Zahvaljujući metamerizmu dovoljna su tri primara za dobivanje boje aditivnim miješanjem u oku promatrača. Međutim, dobivanje boja miješanjem komponenata čiji je broj manji od 31 (odgovara svim komponentama u području spektra) nužno zahtijeva definiranje referentne svjetlosti (slika 1).

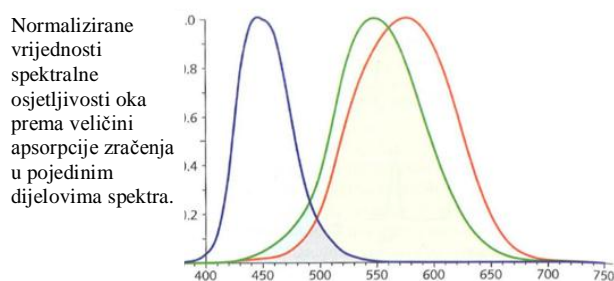


Slika 1. Gustoća snage zračenja CIE D<sub>65</sub> izvora svjetlosti [3]

Referentna svjetlost je definirana svojom spektralnom karakteristikom i temperaturom boje. Referentnom svjetošću se osvijetljavaju elementi scene čije boje se žele izjednačiti s bojama određenih količina primara na zaslonu. Nije moguća potpuno točna reprodukcija boje s tri aditivna primara koja bi podrazumjevala točni opis spektralne karakteristike boje elementa iz scene nastale umnoškom spektralne karakteristike rasvjete i spektralne karakteristike koeficijenta refleksije elementa scene. Boje nastale reflektiranjem svjetla s elemenata iz snimane scene ne ovise samo od pigmentata, već i od spektralne karakteristike rasvjete. Za postizanje izjednačenja boje dva elementa u sceni snimanih s rasvjetama različitih spektralnih karakteristika potrebno je postići izjednačenje spektara takva dva elementa scene.

Znači videokamera je onoliko točna u analiziranju vrste boje snimane scene ukoliko i samo ukoliko stvori na svojim izlazima različite tropodražajne vrijednosti (R,G,B vrijednost) od boja različitih spektralnih karakteristika, a koje se i ljudskim vidom doživljavaju kao različite boje u snimanoj sceni. Da bi se videokamera ponašala kao ljudsko oko filterske karakteristike (spektralna osjetljivost) videokamere moraju biti vrlo slične spektralnoj osjetljivosti oka (slika 2).

Spektralna osjetljivost oka vezana je za tri krivulje spektralne osjetljivosti čunjića za *plavi, zeleni i crveni* dio spektra. Prema CIE (Comission Internationale d'Éclairage- međunarodni odbor za rasvjetu) normama usvojenim 1931. godine definirane su krivulje za miješanje boja (krivulje za izjednačenje boja, težinske funkcije, distribucijski koeficijenti) standardnog promatrača kojima je na temelju brojnih eksperimenata karakteriziran odnos između spektralne karakteristike svjetlosti i opažene boje (slika 3). Dakle, normama CIE nije se pokušalo odrediti spektralne osjetljivosti čunjića već uspoređivanjem mješavine svjetlosnih izvora (određene zadane boje) s mješavinom tri izvora različite spektralne karakteristike svjetlosti, odrediti udio pojedinih svjetlosnih tokova u mješavini potrebnih za vizualno izjednačenje sa zadanim bojama. Preciznije rečeno karakteristike spektralne osjetljivosti videokamere moraju što točnije odgovarati CIE težinskim funkcijama ili biti njihova linearna kombinacija u cilju točne analize boje snimane scene.



**Slika 2.** Spektralna osjetljivost tri vrste čunjića u mrežnici oka [3], [4]

*S* - krivulja koja odgovara spektralnoj osjetljivosti oka u plavom dijelu spektra vidljive svjetlosti (*S* vrsta čunjića). Vršna osjetljivost je na 440nm.

*M* - krivulja koja odgovara spektralnoj osjetljivosti oka u zelenom dijelu spektra vidljive svjetlosti (*M* vrsta čunjića). Vršna osjetljivost je na 540nm.

*L* - krivulja koja odgovara spektralnoj osjetljivosti oka u crvenom dijelu spektra vidljive svjetlosti (*L* vrsta čunjića). Vršna osjetljivost je na 570 nm.

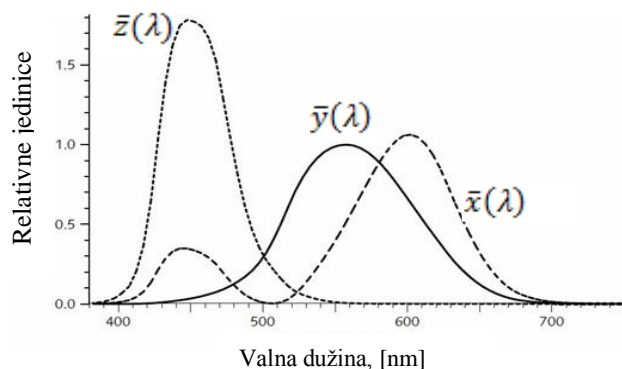
Krivuljama za miješanje boja (težinske funkcije) prema Hunt-Pointer-Estévezu (slika 2) opisane su spektralne osjetljivosti tri vrste čunjića u mrežnici oka [5], [6]. Kod primjene ovih krivulja u videokameri poželjno je radi smanjenja veličine šuma u izlaznim signalima slikovnih senzora krivulju *L* pomaknuti prema iznosima većih valnih dužina. Međutim, u tom slučaju se pogoršava točnost analiziranih boja.

Oblik krivulja za miješanje boja (težinske funkcije) koje moraju biti primijenjene (ili njihove linearne kombinacije) kod videokamere kao karakteristike spektralne osjetljivosti slikovnih senzora kada se žele analizom obuhvatiti sve boje čovjekove okoline prikazane su na slici 3.

Težinska funkcija  $\bar{y}(\lambda)$  razmjerno je prilagođena (normalizirana) na vrijednost 1 na valnoj dužini 560nm i jednaka je krivulji luminoznosti  $V(\lambda)$ .

$\bar{x}(\lambda)$  i  $\bar{z}(\lambda)$  težinske funkcije normalizirane su na način da su im vrijednosti integrala jednakake s vrijednošću integrala  $\bar{y}(\lambda)$  funkcije.

Težinske funkcije (kao analizatorske funkcije slikovnih senzora) ne smiju se miješati sa karakteristikama spektralne gustoće snage izvora zračenja. Izračunavanje CIE XYZ tropodražajnih vrijednosti iz težinskih funkcija ( $\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$ ,  $\bar{z}(\lambda)$ ) izvodi se integriranjem produkta spektralne karakteristike referentne svjetlosti i težinskih funkcija. Ukoliko se umjesto XYZ tropodražajnih vrijednosti primarnih izvora svjetlosti izračunavaju XYZ tropodražajne vrijednosti s površina elemenata u sceni tada se kod izračunavanja uzima u obzir produkt spektralne karakteristike referentne svjetlosti sa spektralnom karakteristikom koeficijenta refleksije ( $\rho$ ) s promatranog elementa u sceni.



**Slika 3.** CIE, 1931., 2000 krivulje za miješanje boja (težinske funkcije) [3]

Na slici 4 prikazano je izračunavanje CIE XYZ vrijednosti u diskretnom obliku, za primarne izvore, množenjem transponirane matrice vrijednosti težinskih funkcija ( $\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$ ,  $\bar{z}(\lambda)$ ) i matrice s vrijednostima spektralne karakteristike izvora svjetlosti  $D_{65}$ . Vrijednosti se odnose na intervale od 10 nm a područje valnih duljina je od 400 nm do 700 nm. Prema tome XYZ vrijednosti opisuju tri svjetlosna izvora čijim bi se miješanjem mogle dobiti sve boje iz čovjekove okoline. Međutim, dogovorom je usvojeno da Y vrijednost nosi podatak o sjajnosti (luminanciji) a da X i Z vrijednosti nose podatke o vrsti boje i zasićenju. Zbog toga je na slici 4 u matrici težinskih funkcija, funkcija  $\bar{y}(\lambda)$  razmjerno prilagođena do vrijednosti 1 na valnoj dužini 560nm (karakteristika osjetljivosti oka,  $\bar{y}(\lambda) = V(\lambda)$ ). Uz pomoć sve tri vrijednosti se može dobiti podatak o svjetlosti (luminanciji i boji).

Na ovaj način definirani CIE XYZ primari nisu fizički izvedivi, ali su jednako korisni kod izračunavanja kromatskih koordinata odnosno specifikacije svih boja u prirodi isto kao i realni (fizički ostvarivi) primari.

Zahvaljujući linearnim odnosima između primara u mješavini svjetlosti prema njihovom udjelu u pojedinim



obojenim svjetlostima koje sudjeluju u mješavini moguće je realizirati bilo koji triplet (R,G,B) kao tropodražajne vrijednosti koji su netrivialna linearna kombinacija X,Y,Z vrijednosti. RGB vrijednosti se dobivaju iz XYZ vrijednosti matricnom ( $3 \times 3$ ) transformacijom.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,0143 & 0,0004 & 0,0679 \\ 0,0435 & 0,0012 & 0,2074 \\ 0,1344 & 0,0040 & 0,6456 \\ 0,2839 & 0,0116 & 1,3856 \\ 0,3483 & 0,0230 & 1,7471 \\ 0,3362 & 0,0380 & 1,7721 \\ 0,2908 & 0,0600 & 1,6692 \\ 0,1954 & 0,0910 & 1,2876 \\ 0,0956 & 0,1390 & 0,8130 \\ 0,0320 & 0,2080 & 0,4652 \\ 0,0049 & 0,3230 & 0,2720 \\ 0,0093 & 0,5030 & 0,1582 \\ 0,0633 & 0,7100 & 0,0782 \\ 0,1655 & 0,8620 & 0,0422 \\ 0,2904 & 0,9540 & 0,0203 \\ 0,4334 & 0,9950 & 0,0087 \\ 0,5945 & 0,9950 & 0,0039 \\ 0,7621 & 0,9520 & 0,0021 \\ 0,9163 & 0,8700 & 0,0017 \\ 1,0263 & 0,7570 & 0,0011 \\ 1,0622 & 0,6310 & 0,0008 \\ 1,0026 & 0,5030 & 0,0003 \\ 0,8544 & 0,3810 & 0,0002 \\ 0,6424 & 0,2650 & 0,0000 \\ 0,4479 & 0,1750 & 0,0000 \\ 0,2835 & 0,1070 & 0,0000 \\ 0,1649 & 0,0610 & 0,0000 \\ 0,0874 & 0,0320 & 0,0000 \\ 0,0468 & 0,0170 & 0,0000 \\ 0,0227 & 0,0082 & 0,0000 \\ 0,0114 & 0,0041 & 0,0000 \end{bmatrix}^T \cdot \begin{bmatrix} 82,75 \\ 91,49 \\ 93,43 \\ 86,68 \\ 104,86 \\ 117,01 \\ 117,81 \\ 114,86 \\ 115,92 \\ 108,81 \\ 109,35 \\ 107,80 \\ 104,79 \\ 107,69 \\ 104,41 \\ 104,05 \\ 100,00 \\ 96,33 \\ 95,79 \\ 88,69 \\ 90,01 \\ 89,60 \\ 87,70 \\ 83,29 \\ 83,70 \\ 80,03 \\ 80,21 \\ 82,28 \\ 78,28 \\ 69,72 \\ 71,61 \end{bmatrix}$$

**Slika 4.** Izračunavanje tropodražajnih vrijednosti (XYZ primara) za izvor svjetlosti CIE D<sub>65</sub> [3]

Izračunavanje tropodražajnih vrijednosti množenjem matrica  $[\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)]$  težinskih funkcija s diskretnim vrijednostima nad intervalima od 10 nm s diskretnim vrijednostima karakteristike gustoće snage zračenja CIE D<sub>65</sub> izvora svjetlosti. Ekspozent T označava operaciju transponiranja matrice. Rezultat množenja matrica su XYZ tropodražajne vrijednosti (primari).

### 3. ODNOS SPEKTRALNE OSJETLJIVOSTI VIDEOKAMERA I SPEKTRALNE GUSTOĆE SNAGE ZRAČENJA PRIMARA ZASLONA

Prema ITU-R Recommendation BT.709 (International Telecommunications Union – Radiocommunications Sector- Broadcast Technology- međunarodna agencija za norme u području telekomunikacija) normama za studijski digitalni video i kodiranje boja za televiziju visoke kvalitete HD (High Definition), [7], definirani su primarni svjetlosni izvori (primari) zaslona prema sljedećoj matrici:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,412453 & 0,357580 & 0,180423 \\ 0,212671 & 0,715160 & 0,072169 \\ 0,019334 & 0,119193 & 0,950227 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R_{709} \\ G_{709} \\ B_{709} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Referentni izvor svjetlosti za gornje primare je D<sub>65</sub>. U srednjem redu se nalaze koeficijenti vezani uz luminanciju pojedinih primara kod miješanja bijele boje D<sub>65</sub>. Zbog toga što je bijela normalizirana, suma koeficijenata srednjeg reda matrice jednaka je jedinici.

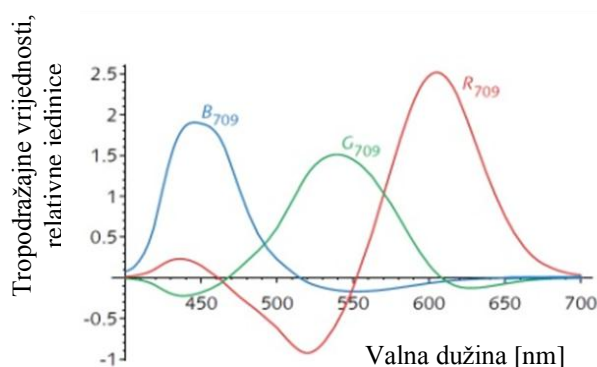
Invertiranjem  $3 \times 3$  matrice dobivaju se BT.709 primari:

$$\begin{bmatrix} R_{709} \\ G_{709} \\ B_{709} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3,240479 & -1,537150 & -0,498535 \\ -0,969256 & 1,875992 & 0,041556 \\ 0,055648 & -0,204043 & 1,057311 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (2)$$

Prema negativnim vrijednostima nekih članova matrice može se zaključiti da su XYZ vrijednosti, koje se nalaze izvan područja gamuta BT.709, R,G,B primara, transformirane u negativne ili veće od jedinice R,G,B vrijednosti. Isto tako to znači da se dobivanje svih boja miješanjem tropodražajnih vrijednosti BT.709, R,G,B primara ne može ostvariti s fizičkim R,G,B svjetlosnim izvorima. Međutim, negativne vrijednosti koeficijenata bitne su za kolorimetrijski točnu reprodukciju boja unutar područja zadanog kromatskim koordinatama primara. Ukoliko se u gornju matricu (2) unesu vrijednosti težinskih funkcija  $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$  dobivaju se težinske funkcije primara  $\bar{r}(\lambda), \bar{g}(\lambda), \bar{b}(\lambda)$  prikazane na slici 5.

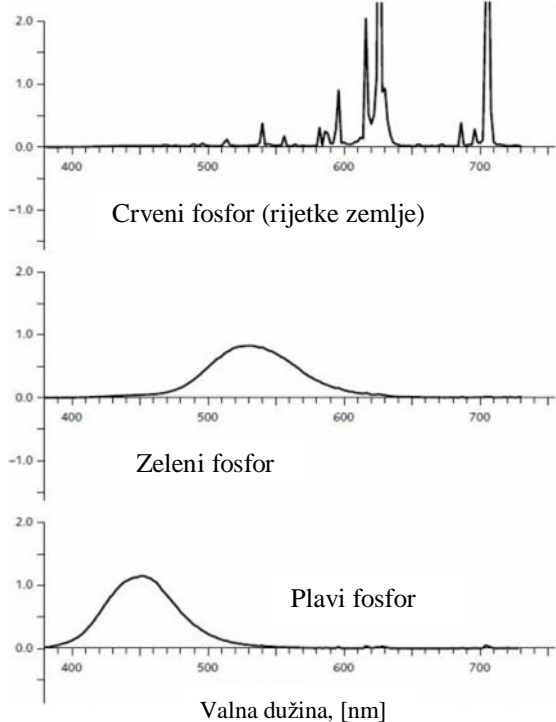
S teoretske strane gledano oblik ovih težinskih funkcija korektan je za kromatske koordinate fizički ostvarivih BT.709 R,G,B svjetlosnih primara (slika 6), međutim s praktične strane oblik ovih krivulja ne može se realizirati u videokamerama kao njihova karakteristika spektralne osjetljivosti.

Karakteristike spektralne osjetljivosti videokamere ne mogu biti realizirane s oblikom koji u sebi sadrži dijelove s negativnim vrijednostima osjetljivosti. Teoretski korektan oblik težinskih funkcija za primare BT.709 s kojima se analiziranjem boja snimane scene dobivaju R,G,B signali prikazan je na slici 5. Pobuđivanjem zaslona koji koriste primare BT.709, ovim R,G,B signalima, dobiva se ispravna reprodukcija boja. Kako zbog negativnih vrijednosti kod ovih karakteristika one nisu ostvarive kao spektralne osjetljivosti videokamere, korištenjem CIE XYZ



**Slika 5.** Krivulje za miješanje boja za BT.709 primare [13]

težinskih funkcija i obradom signala  $3 \times 3$  linearnom matricom one se mogu realizirati kao spektralna osjetljivost videokamere (slika 5). Isto tako, ukoliko se pođe od pretpostavke fizički ostvarivih težinskih funkcija  $\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$ ,  $\bar{z}(\lambda)$ , koje su u cijelom svom području definicije pozitivne (slika 3), kao spektralne osjetljivosti videokamere, dolazi se do problema fizički ne ostvarivih spektralnih karakteristika gustoće jakosti svjetlosti svjetlosnih primara (X,Y,Z) na zaslonu. Razlog je vidljiv u činjenici da se na primjer za dobivanje vrijednosti  $[0,1,0]$  za XYZ primare ne može iz težinskih funkcija  $\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$ ,  $\bar{z}(\lambda)$  odabrati vrijednost amplitude težinske funkcije koja doprinosi Y primaru, a da pri tome istovremeno ne doprinosi X i Z primarima.



Slika 6. Spektralne gustoće snage zračenja (Sony Trinitron) BT.709 primara zaslona [3]

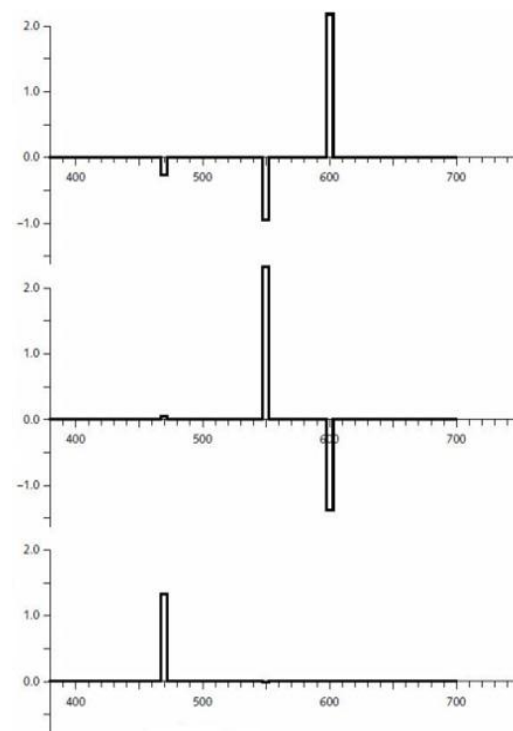
Prikazane spektralne gustoće zračenja (na ordinatama su relativne jedinice) odgovaraju kromatskim koordinatama prema SMPTE RP 145 preporukama[8] koje su slične BT.709 koordinatama. Mnogi oblici karakteristika spektralnih gustoća zračenja fosfora mogu imati ISTE kromatske koordinate.

Nastali problem bi se mogao riješiti tako da se za takve valne dužine, u spektru, vrijednostima spektralnih karakteristika radijance X i Z primara pridruži negativna vrijednost (slika 7). Međutim, negativna vrijednost radijance značila bi za svjetlosni primar negativnu gustoću jakosti svjetlosti, odnosno izvor svjetlosti koji fizički nije ostvariv.

Dakle, zaslone s (X,Y,Z) primarima koji bi bili pobuđeni signalima dobivenim iz videokamere sa spektralnim karakteristikama oblika  $\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$ ,  $\bar{z}(\lambda)$  težinskih funkcija nisu fizički izvedivi.

Zaključak provedenih razmatranja je da se istovremeno ne mogu koristiti fizički ostvarive

karakteristike spektralne osjetljivosti videokamere i karakteristike spektralne gustoće jakosti svjetlosti primara zaslona.



Slika 7. Hipotetska spektralna gustoća snage zračenja CIE XYZ primara [3]

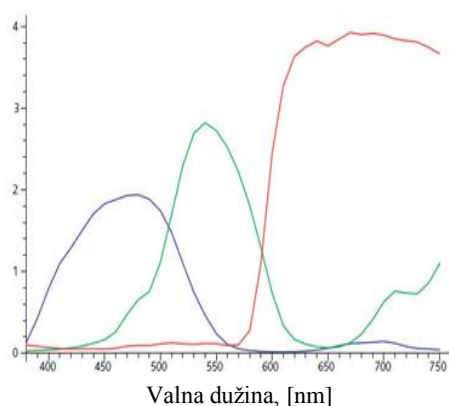
Za izravnu reprodukciju snimane scene s CIE  $\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$ ,  $\bar{z}(\lambda)$  težinskim funkcijama potrebne su spektralne gustoće snage zračenja primara koje nisu fizički ostvarive (na ordinatama su relativne jedinice). Ne mogu se realizirati negativne vrijednosti gustoće snage zračenja. Različite kombinacije spektralnih gustoća snaga za X, Y, i Z primar su moguće. Na slici je prikazan hipotetski primjer s monokromatskim izvorima zračenja na 470, 550 i 600nm.

#### 4. LINEARNA MATRICA

Jedno od rješenja gore spomenute zagonetke, nametnute osobinama ljudskog vida, nalazi se u uvođenju  $3 \times 3$  linearne matrice u obradu signala dobivenih iz slikovnih senzora. Naziv *linearan* prvenstveno se odnosi na obradu signala nakon linearne optičko-električne transformacije fizikalnih veličina (gustoće jakosti svjetla u električni signal na slikovnim sensorima) te znači da se linearni odnosi miješanja svjetlosnih tokova prenose (transformiraju) u linearne odnose između električnih veličina. Nakon matricne korekcije signala slijedi gama korekcija. Uzimajući signale iz tri slikovna senzora konkretne videokamere, čije su karakteristike spektralne osjetljivosti prikazane na slici 8, za direktno pobuđivanje BT.709 R,G,B primara zaslona imat će za posljednicu dobivanje boja vrlo sličnih onima u snimanoj sceni. Na slici 9 su prikazane kromatske koordinate 24 uzorka GretagMacbeth [9] kolor ispitne tablice izmjerene kolorimetrom. Kada se

ista ispitna tablica snimi s konkretnom digitalnom videokamerom (karakteristike prikazane na slici 8), i s R,G,B signalima dobivenim direktno sa slikovnih senzora pobudi zaslon, dobiju se kromatske koordinate za svaku boju ispitne tablice prikazane na slici 10.

Ovdje je važno napomenuti da su kromatske koordinate dobivene reprodukcijom R,G,B signala na zaslonu s BT.709, R,G,B primarima. Nedostatak, odnosno izobličenje u reprodukciji boja vidljivo je kao znatno smanjeno zasićenje boja ispitne tablice. Gubitak zasićenja reproduciranih boja uglavnom je uzrokovan nedostatkom negativnih vrijednosti u karakteristikama spektralne osjetljivosti slikovnih senzora. Očito je da su tri signala na izlazu videokamere interpretirana na zaslonu kao tri primara sa svojim kromatskim koordinatama ( $R_{TSC230}$ ,  $G_{TSC230}$ ,  $B_{TSC230}$ ). (3).

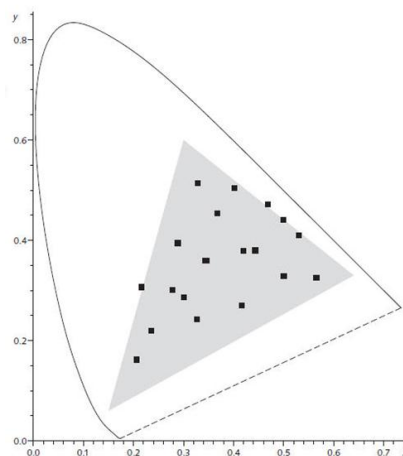


**Slika 8.** Oblik karakteristika spektralne osjetljivosti prosječne digitalne videokamere [13]

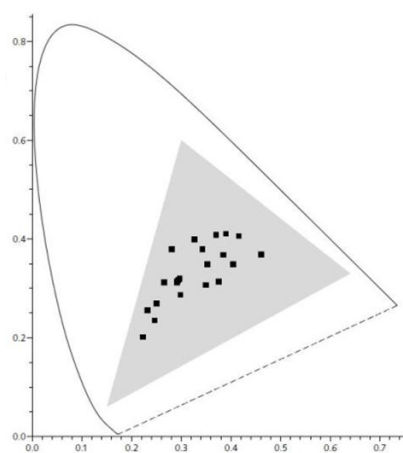
Karakteristika spektralne osjetljivosti konkretne digitalne videokamere razlikuje se od CIE  $\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$ ,  $\bar{z}(\lambda)$  težinskih funkcija te se signali dobiveni sa slikovnih senzora ne mogu interpretirati kao oni koji su potrebni za pobudu XYZ primara. Isto tako oblik ovih karakteristika (na ordinati su relativne jedinice) se razlikuje od onih za BT.709 primare te se signali ne mogu interpretirati kao oni koji su potrebni za pobudu BT.709 primara zaslona. Međutim uz primjenu optimizirane linearne 3x3 matrice mogu se dobiti signali s kolorimetrijski korektnim vrijednostima za pobudu realnih BT.709 primara zaslona.

Pitanje koje se nameće je ima li videokamera na izlazu sa svojih slikovnih senzora definirane primare. Odgovor se nalazi u linearnoj matrici čija uloga je da zadanu spektralnu osjetljivost videokamere (digitalnog fotoaparata, digitalne filmske kamere) prilagodi točno definiranim R,G,B primarima zaslona. Drugim riječima, da se linearnim kombinacijama R,G,B spektralnih karakteristika videokamere (slika 11) dobiju takve nove spektralne karakteristike (slika 12) koje se u najvećoj mjeri podudaraju s težinskim funkcijama zadanih primara zaslona (npr. BT.709), (slika 5). Korištenjem samo pozitivnih vrijednosti spektralne osjetljivosti videokamere, bez obrade signala linearnom matricom,

osim smanjenja zasićenja reproduciranih boja dovelo bi do određenih promjena u vrsti reproducirane boje [10].

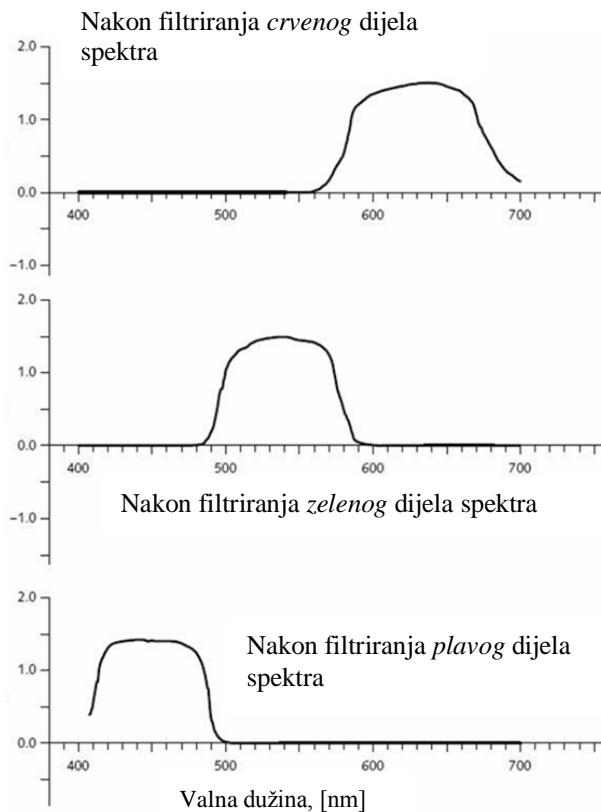


**Slika 9.** Kromatske koordinate boja ispitne tablice u CIE dijagramu boja izmjerene kolorimetrom. Trokutom su obuhvaćene boje koje se mogu reproducirati s BT.709 primarima zaslona [13]

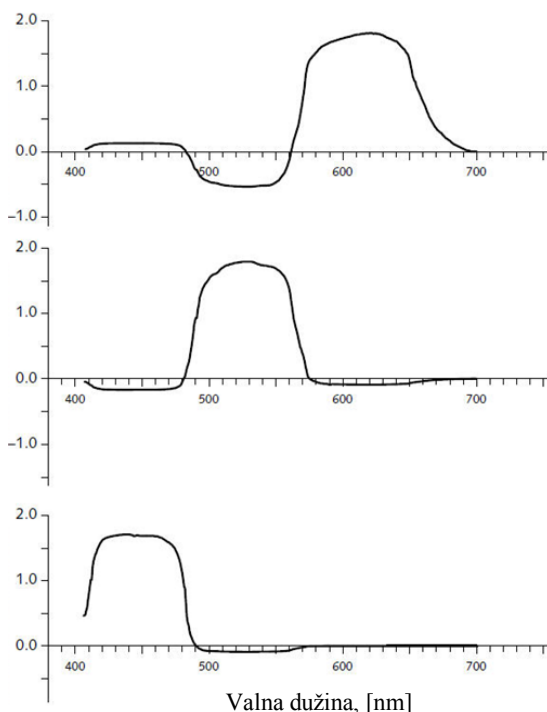


**Slika 10.** Kromatske koordinate boja ispitne tablice dobivene snimanjem konkretnom digitalnom videokamerom i reprodukcijom na zaslonu s BT.709 primarima. Izobličenje u reprodukciji boja uzoraka u vidu smanjenog zasićenja posljedica je izravne primjene R,G,B signala sa slikovnih senzora za pobuđivanje zaslona [13]

Optimizacija linearne matrice podrazumijeva da se za svaku videokameru i definirane primare zaslona odaberu one boje koje se žele kolorimetrijski najtočnije reproducirati. Ostale boje će tada biti reproducirane s manjom točnošću odnosno većim odstupanjem od boja u sceni (izraženo npr.  $\Delta E_{ab}$  metrikom percepcijsko-uniformnog dijagrama boja [11], [12]). Odabrane boje mogu biti boja ljudske kože, skala sivoga, određene monokromatske boje iz područja spektralnih boja i boje elemenata scene (sa svojim spektralnim karakteristikama koeficijentata refleksije) najčešće susretane pod standardnim (referentnim) izvorima rasvjete.



**Slika 11.** Karakteristike spektralne osjetljivosti videokamere (primjenom dikroidnih zrcala) dobivene na izlazima R,G,B slikovnih senzora [3]



**Slika 12.** Karakteristike spektralne osjetljivosti videokamere nakon obrade matricom optimiziranom za BT.709 primare zaslona [3]

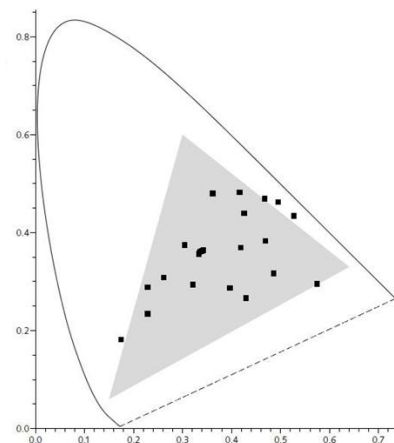
*Karakteristike spektralne osjetljivosti videokamere (na ordinatama su relativne jedinice) dobivene nakon obrade*

*R,G,B signala (dobivenih iz slikovnih senzora prema karakteristikama prikazanim na slici 11) odgovarajućom  $3 \times 3$  linearnom matricom. Točnost analize boja snimane scene s ovim karakteristikama je onolika koliko se oblik novonastalih karakteristika podudara s idealnim težinskim funkcijama BT.709 primara zaslona prikazanih na slici 5.*

Za karakteristiku spektralne osjetljivosti konkretne videokamere prikazane na slici 8, nakon obrade videosignala linearnom matricom (3), dobivaju se kromatske koordinate reproduciranih boja prikazanih na slici 13, [13].

$$\begin{pmatrix} \tilde{R} \\ \tilde{G} \\ \tilde{B} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,7659 & 0,7052 & -0,4990 \\ -0,3140 & 1,3283 & -0,1367 \\ 0,0609 & -0,4739 & 1,0326 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R_{T5C230} \\ G_{T5C230} \\ B_{T5C230} \end{pmatrix} \quad (3)$$

Obrada videosignala podrazumijevala je optimizaciju linearne matrice za BT.709, R,G,B primare zaslona i za što manje odstupanje kromatskih koordinata boja ispitne tablice od onih dobivenih mjerenjem kolorimetrom. Prosječno odstupanje iznosilo je  $5\Delta E_{ab}$  (ovdje treba imati na umu da vrijednosti luminancija nema u dijagramu boja na slici 13).



**Slika 13.** Korigirane vrijednosti kromatskih koordinata konkretne digitalne videokamere matricnom obradom R,G,B signala [13]

*Kromatske koordinate boja ispitne tablice dobivene snimanjem konkretnom digitalnom videokamerom, matricnom obradom signala i reprodukcijom na zaslonu s BT.709 primarima. Na dijagramu boja su kromatske koordinate uzoraka boja sada vrlo blizu onima dobivenim mjerenjem kolorimetrom prikazanim na slici 9.*

## 5. ZAKLJUČAK

U matricnoj jednadžbi (1) polazište su bile CIE težinske funkcije s XYZ primarima. Ovim primarima obuhvaćene su kromatske koordinate svih boja u čovjekovoj okolini. Korektnost prijenosa podataka o boji u digitalnim videosustavima odnosi se na one boje koje



leže unutar trokuta u kromatskom dijagramu čiji vrhovi imaju koordinate određenih svjetlosnih primara zaslona (gamut boja). Boje s kromatskim koordinatama izvan trokuta ne mogu biti korektno reproducirane. Ukoliko bi videokamera bila konstruirana za prijenos svih boja (s  $\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$ ,  $\bar{z}(\lambda)$  težinskim funkcijama), njena složenost bila bi puno veća, a karakteristike znatno lošije od videokamera s manjim gamutom odnosno s težinskim funkcijama fizički ostvarivih primara (npr. BT.709). Na sreću, najčešće susretane boje u čovjekovoj okolini samo su mali dio ukupnog broja boja. Veliki broj boja nalazi se u središnjem dijelu dijagrama boja, a koji je obuhvaćen trokutom primara zaslona. BT.709 primarima nije obuhvaćen dio boja koji se nalazi u području boja cijana i određenih boja susretanih u tisku. Za reprodukciju na zaslonima i ovih boja razvijaju se videosustavi sa širokim gamutom reprodukcije boja (xvYCC i ostali).

S konstruktivne strane izvedba linearne matrice prema matričnoj jednadžbi (2) u sklopovima obrade signala u videokameri dovela bi do generiranja neželjenog šuma u R kanalu (koeficijent 3,42 u matrici) i G kanalu. Pojava koeficijenata većih od jedinice u  $3 \times 3$  matrici posljedica je velikog preklapanja  $\bar{x}(\lambda)$  i  $\bar{y}(\lambda)$  težinskih funkcija. Dakle, sa stajališta veličine šuma u R,G,B signalima optimalna matrica bi morala biti jedinična matrica. Iz spomenutih razloga polazište kod projektiranja matrice za određene primare (npr. BT.709) jesu  $\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$ ,  $\bar{z}(\lambda)$  težinske funkcije ali tako da se optimizacijom matrice traže najbolji odnosi između zadovoljavajućih veličina odnosa signala/šuma u R,G,B kanalima, osjetljivosti, prihvatljivog stupnja metamerizma i zadovoljavajuće točnosti u reprodukciji boja. Stupanj metamerizma kod videokamere bit će prisutan u onoj mjeri koliko je odstupanje spektralnih karakteristika, dobivenih nakon obrade signala linearnom matricom, od CIE težinskih funkcija. Metamerizam nije povezan s gamutom određenih primara. Točnost reprodukcije boja osim što je ovisna od spektralne karakteristike videokamere u velikoj mjeri ovisi od spektralnog sastava rasvjete i spektralne karakteristike koeficijenta refleksije elemenata u snimanoj sceni. Optimizacija matrice vrlo tijesno je povezana s izborom filtarskih karakteristika R,G,B optičkih filtara, a dimenzioniranje linearne matrice i odabir karakteristika optičkih filtara neposredno su vezani uz fizikalne karakteristike korištenih izvora rasvjete i najčešće susretanih elemenata u snimanim scenama. Dobiveni R,G,B podaci uvijek su jednoznačno povezani s prijenosnom karakteristikom optičko-električne transformacije i kromatskim koordinatama primara koji odgovaraju istima na zaslonima koji su namijenjeni za korektnu reprodukciju boje tih podataka. R,G,B podaci za koje se ne zna na koje primare zaslona se odnose, mogu odabirom krivih zaslona proizvesti znatna kolorimetrijska odstupanja od boja snimane scene.

## 6. LITERATURA

- [1] Schöberl, M; Brückner, A.; Foessel, S.; Kaup, A.: Photometric Limits for Digital Camera Systems, SPIE Journal of Electronic Imaging, Vol. 21, Num. 2, Jun. 2012
- [2] CIE 15, Colorimetry, 3rd Edition, Vienna, Austria, 2004
- [3] Poynton, C.: Digital video and HDTV algorithms and interfaces, Morgan Kaufmann, San Francisco, 2003
- [4] Winkler, S.: Digital video quality: vision models and metrics, John Wiley & Sons Ltd, West Sussex, 2005
- [5] Hunt, Robert W. G.: The reproduction of Colour, Sixth Edition, Wiley, Chichester, U.K., 2004
- [6] Hunt, Robert W. G., Pointer, Michael R.: Measuring Colour, Fourth Edition, Wiley, Chichester, U.K., 2011
- [7] ITU-R BT.709-5-2002 - Parameter Values for the HDTV Standards for Production and International Programme Exchange, ITU, Geneva, Switzerland, April, 2002
- [8] RP 145:2004 (Archived 2010) SMPTE C Color Monitor Colorimetry
- [9] <http://www.edmundoptics.com/testing-targets/test-targets/color-grey-level-test-targets/gretag-macbeth-colorchecker/1815> (Dostupno:13.11.2012.)
- [10] Spronson, W.N., Colour Science in Television and Display Systems, Adam Hilger Ltd., Bristol, 1983
- [11] EBU- TECH 3320, User requirements for Video Monitors in Television Production, Geneva, 2010
- [12] EBU- TECH 3335, Methods of measuring the imaging performance of television cameras for the purposes of characterisation and setting, Geneva, January, 2012
- [13] Poynton, Charles: Wide-gamut image capture, in Proc. IS&T CGIV, Fourth European Conf. on Colour in Graphics and Imaging: 471-482, 2010

### Kontakt autora:

**mr. sc. Dragan Matković, dipl.ing.**  
 Veleučilište u Varaždinu  
 J. Križanića 33/6  
 Tel.: 385 42 493325,  
 e-mail: dragan.matkovic@velv.hr