

Uporaba modelov barvnih prilagoditev za napoved barv na zaslonu

Use of Chromatic Adaptation Transforms for Prediction of Colours on Display

Izvirni znanstveni članek/Original Scientific Article

Prispelo/Received 04-2014 • Sprejeto/Accepted 07-2014

Izvleček

Barvno upravljanje je osnovna metoda, s katero lahko v elektronski grafični pripravi zagotovimo optimalen prikaz barv na zaslonu. Namen raziskave je bil ugotoviti, ali se lahko z modeli barvnih prilagoditev napove prikaz barv na zaslonu s širokim barvnim obsegom (angl. Wide Gamut Display) pri spremembi bele točke zaslona od 6500 K k naslednjim vrednostim barvnih temperatur bele točke zaslona: 5000 K, 5500 K, 7000 K, 7500 K in 9300 K. Za prilagoditev barve so bili uporabljeni trije različni modeli barvnih prilagoditev: bradfordski, von Kriesov in XYZ Scaling. Meritve barv pri beli točki 6500 K so bile določene za referenčne, na katerih so se izvajali preračuni z modeli barvnih prilagoditev k drugim belim točkam. Za ovrednotenje rezultatov so bile izračunane barvne razlike med izmerjenimi in prilagojenimi barvnimi vrednostmi pri posamezni beli točki. Rezultati izračunanih barvnih razlik so pokazali majhne barvne razlike (vrednosti pod 3) za veliko število barvnih polj pri vseh parih belih točk, s čimer je dokazano, da z modeli barvnih prilagoditev lahko zadovoljivo opišemo prikaz barv na zaslonu. Najboljši rezultati so bili doseženi s prilagoditvijo barvnih vrednosti po modelu XYZ Scaling, dobro se je obnesel tudi von Kriesov model, bradfordski pa je nasprotno od pričakanj dal najslabše rezultate. Potrjeno je bilo, da barvne razlike med prilagojenimi in izračunanimi barvnimi vrednostmi rastejo sorazmerno z barvno razliko med izhodiščno in ciljno točko, saj so bile največje barvne razlike izračunane za par belih točk med 6500 K in 9300 K, najmanjše pa za par med 6500 K in 7000 K. Ključne besede: zaslon, barvna prilagoditev, model XYZ Scaling, bradfordski model, von Kriesov model

Abstract

Colour management is the basic method which guarantees the optimal appearance of colour on computer displays in digital prepress. The aim of this research was to determine whether it is possible to predict the appearance of colour on a wide gamut display using chromatic adaptation transforms when changing the display white point from 6500 K to the following values of the colour temperature of the display white point: 5000 K, 5500 K, 7000 K, 7500 K and 9300 K. For a colour adaptation, three chromatic adaptation transforms were used, i.e. bradford, von Kries and XYZ Scaling model. The measurements obtained at 6500 K white point were used as reference to calculate the adapted colour values for the remaining five white points. Finally, the colour differences between the measured and adapted colour values for each white point were calculated to evaluate the performance of each chromatic adaptation transform. The results of calculated colour differences showed small colour differences (values below 3) for a large number of colour patches for all white point pairs; in consequence, it was confirmed that it is possible to satisfactorily predict the appearance of colour on a display using chromatic adaptation transforms. The best results were obtained with the XYZ Scaling model, the von Kries model also gave good results, whereas the bradford model gave contrary to expectations the worst results. It was also confirmed that the values of colour differences increase relative to the rise of colour differences between the source and destination white point, as the biggest colour difference was observed between 6500 K and 9300 K white points and the smallest between 6500 K and 7000 K. The research also showed that different chromatic adaptation transforms adapt the colour values of different colours well in respect to their lightness, chroma and hue. Keywords: display, chromatic adaptation, XYZ Scaling model, bradford model, von Kries model

1 Uvod

Barvno upravljanje je pri digitalnem oblikovanju in elektronski grafični pripravi dandanes osnovna metoda za zagotavljanje tako pravilnega prikaza barv na zaslonu kot tudi njihove pravilne reprodukcije na ciljnim mediju. Poleg nastavitve naprav in razmer opazovanja je pomemben dejavnik pri korektnem prikazovanju tudi človekovo vizualno dožemanje barv. Na dožemanje barve v naših možganih namreč močno vpliva naša sposobnost ohranjanja vtisa barve s prilagajanjem spremembi svetlobnega vira ali razmer opazovanja, ki jo imenujemo barvna prilagoditev (angl. *chromatic adaptation*). Barvna prilagoditev je prilagoditev, ki jo človeški vizualni sistem izvede ob spremembi svetlobnega vira, tako da ohrani vtis barve.

Glavni sestavni deli vidnega sistema, ki človeku omogočajo izvajanje barvne prilagoditve, so različni barvni fotoreceptorji. Poleg receptorjev za svetlost (paličic) človeško oko vsebuje tudi tri vrste čepkov, ki opišejo občutljivost očesa na dolgovalovno (L – long), srednjevalovno (M – medium) in kratkovalovno (S – short) območje vidne svetlobe. Kombinacija dražljajev teh treh vrst fotoreceptorjev v možganih da vtis določene barve, kar sovpada z Grassmannovo teorijo o aditivnem mešanju, ki pravi, da lahko katerokoli vidno barvo sestavimo s kombinacijo treh primarnih svetlob. Pri spremembi svetlobe pa se odziv določene vrste čepkov prilagodi, to pomeni zmanjša oziroma poveča, skladno z zmanjšanjem ali povečanjem spektralne komponente vpadle svetlobe. Čepki v človeškem očesu so zmožni neodvisno drug od drugega prilagajati svojo občutljivost in s tem vizualni dražljaj, tako da ob spremembi svetlobnega vira ohranijo vtis enake barve [1]. Naprave takšne sposobnosti prilagajanja nimajo, zato jo moramo v proces barvnega upravljanja uvesti s pomočjo modelov barvnih prilagoditev (CAT – angl. *Chromatic Adaptation Transform*). Modeli barvnih prilagoditev (CAT – angl. *Chromatic Adaptation Transform*) so matematični zapisi, s katerimi je opisana človeška sposobnost barvne prilagoditve. CAT so sestavni deli modelov barvnega zaznavanja, vendar se lahko uporabljajo tudi samostojno. Z uporabo CAT torej lahko na podlagi vrednosti CIEXYZ, pridobljenih pod izhodiščnim svetlobnim virom, napovemo barvo pod ciljnim svetlobnim virom [2]. V raziskavi so bili uporabljeni trije modeli barvnih prilagoditev: Von Kriesov, bradfordski in XYZ Scaling.

Von Kriesov model je najstarejši model barvnih prilagoditev, temelji pa na trditvi Johannaesa von Kriesa

iz leta 1902, da lahko vsakega izmed odzivov človeških barvnih receptorjev linearno pomnožimo z določenim koeficientom ter tako dobimo izhodne vrednosti odzivov čepkov [1, 3, 4]. Bradfordski model je oblikoval dr. Kit Ming Lam z empiričnim eksperimentom, pri katerem je pod različnimi svetlobnimi viri opazoval volnene barvne vzorce [5]. Čeprav je bil oblikovan na relativno majhnem vzorcu meritev, številne raziskave dokazujejo, da za številne aplikacije deluje bolje kot drugi modeli barvnih prilagoditev [5–9]. V njegovo korist zagotovo govori dejstvo, da ga v standardu Specification ICC.1:2004-10 (Profile version 4.2.0.0) priporoča CIE kot privzeti model za prilagoditev barvnih vrednosti pri spremembi bele točke [10]. Model XYZ Scaling velja za manjvrednega v primerjavi s prej opisanimi. Sestavlja ga najpreprostejša linearna diagonalna matrika, ki preslika izhodiščne vrednosti CIEXYZ v ciljne vrednosti le z upoštevanjem svetlobnih virov oz. belih točk [8, 11].

Veliko raziskav je bilo opravljenih o primerjavi bradfordske matrike z drugimi, novejšimi matrikami, večina raziskav pa potrjuje dobro delovanje in uporabnost le-te pred drugimi matrikami. V eni izmed raziskav [5] so obravnavali in ovrednotili delovanje bradfordske matrike v primerjavi z novo predlagano matriko Spectral Sharpening. Iz zbranih rezultatov so raziskovalci povzeli, da vsesplošno uporabljena in priznana bradfordska matrika ni najbolj optimalna, vendar se ni izkazala za slabšo od matrike Spectral Sharpening. Bradfordski model barvne prilagoditve so primerjali tudi z CMCCAT2000 za uporabo pri tisku na kapljicnem tiskalniku [9]. Cilj raziskovalcev je bil določiti, katera izmed barvnih prilagoditev daje manjše barvne razlike pri preslikavi med dvema paroma svetlob (D50-D65 in D65-A) in ali je ta prilagoditev primerna tudi za večje število vzorcev. Podobno kot v naši raziskavi so nato izvedli preračune med parom svetlob s pomočjo omenjenih modelov barvnih prilagoditev ter primerjali dobljene prilagojene vrednosti pod ciljno svetlobo z izmerjenimi pod pripadajočo svetlobo. S primerjavo povprečne barvne razlike za oba modela so ugotovili, da bradfordski model daje najmanjše barvne razlike ter da dobro opiše veliko vzorcev. Razširjena raziskava predhodnega strokovnega članka je obravnavala pet modelov barvnih prilagoditev (bradfordski model, model XYZ Scaling, von Kriesov model, CMCCAT97 ter CMCCAT2000) za uporabo v digitalnem tisku s kapljicnim tiskalnikom. Izračuni so bili tokrat narejeni za kombinacijo

treh svetlob D50-D65, D65-A in D50-A. Zopet se je pokazalo, da so najmanjše barvne razlike med izmerjenimi in prilagojenimi vrednostmi za katerikoli par svetlob dosežene z uporabo bradfordskega modela [8]. Raziskavi sta za izračun barvnih razlik uporabljali enačbi ΔE_{ab}^* in ΔE_{00}^* , rezultati pa so pokazali, da so barvne razlike, izračunane po ΔE_{ab}^* , vedno večje kot ΔE_{00}^* , saj ta uporablja korekcijske faktorje za svetlost, kromo in barvo. Pokazalo se je tudi, da se barvne razlike povečujejo sorazmerno z barvno razliko med izhodiščno in ciljno svetlobo. Zato je bil podoben trend rezultatov pričakovan tudi v naši raziskavi [7, 8].

V eni izmed raziskav [6] so avtorica Sabine Süstrunk in sodelavci naredili obsežen pregled različnih matrik modelov barvnih prilagoditev ter izpeljanih matrik iz standardiziranih barvnih prostorov. Uporabljenih je bilo 16 obsežnih baz podatkov iz predhodnih raziskav drugih raziskovalcev, iz danih podatkov pa so bile izračunane prilagojene vrednosti XYZ, ki so jih primerjali z izmerjenimi podatki. Najmanjše barvne razlike so bile izračunane za matrike Sharp CAT in CMCCAT2000, dobre rezultate pa sta dosegli tudi bradfordska matrika in matrika ROMM RGB, izpeljana iz istoimenskega barvnega prostora. Najslabše se je odrezala von Kriesova matrika.

Naslednja raziskava avtorjev Naoya Katoh in Kiyotaka Nakabayashi govori o implementiranju modelov barvnih prilagoditev na zaslonu ter se poleg pretvorb med izvorno in ciljno svetlobo ukvarja tudi s človeškim dojemanjem barv pri kombinaciji osvetlitve zaslona in okolice. V raziskavi je bilo na primeru zaslona CRT raziskovano, katera izmed matrik različnih modelov barvnih prilagoditev da najboljše rezultate pri napovedi odziva človeškega vizualnega sistema pri uporabi modela mešane prilagoditve. Ta model upošteva, da se opazovalec delno prilagodi na svetlobo zaslona in delno na svetlobo v okolici, kar se upošteva pri preračunih. Raziskavo so izvedli vizualno z opazovalci z normalnim barvnim vidom, ki so primerjali tiskane reprodukcije slik pod osvetlitvijo okolice s prikazanimi različicami na zaslonu ter iskali najbolj podobno digitalno reprodukcijo. Kot najboljša se je zopet pokazala bradfordska matrika, saj je v različnih barvnih območjih dala najmanjše barvne razlike [12]. Cilj naše raziskave je bil ugotoviti, ali lahko z modelom barvnih prilagoditev napovemo prikaz barv na zaslonu, ter kateri izmed modelov barvnih prilagoditev daje najboljše rezultate. Pričakovali smo, da bodo barvne razlike med izmerjenimi in prilagojenimi barvnimi vrednostmi rasle sorazmerno z barvno

razliko med izhodiščno in ciljno belo točko ter da bodo najmanjše razlike med prilagojenimi in izmerjenimi barvnimi vrednostmi pridobljene z uporabo bradfordskega modela barvne prilagoditve.

Rezultati, pridobljeni z raziskavo, dajejo boljše razumevanje o vlogi modelov barvnih prilagoditev pri prikazu barv na zaslonu ter so praktično uporabni v grafiki in tekstilstvu, ko je potreben natančen prikaz barv na zaslonu, na primer v grafični pripravi za tisk, pri digitalnem oblikovanju in pri prikazu izdelkov v spletnih trgovinah.

2 Eksperimentalni del

2.1 Nastavitev bele točke

Meritve v raziskavi so bile izvedene na zaslonu EIZO CE240W (24.1 in, LCD, EIZO) pri nastavljeni maksimalni svetlosti in nastavitvi gama 2,2. Barvne temperature bele točke zaslona so bile nastavljene na 5000 K, 5500 K, 6500 K, 7000 K, 7500 K in 9300 K:

- 6500 K, ki pomeni približno barvno temperaturo standardizirane svetlobe D65, priporoča pa jo Mednarodni komite za razsvetljavo (CIE) v svojem tehničnem poročilu o kolorimetriji (CIE 15: 2004) [13], v raziskavi je bila uporabljena kot referenčna bela točka,
- 5000 K pomeni barvno temperaturo standardizirane svetlobe D50, ki se uporablja v digitalni grafični pripravi za tisk [14],
- 5500 K je približna barvna temperatura standardizirane svetlobe D55 [13],
- 7000 K ne ustreza nobeni standardni svetlobi in je bila v raziskavo vključena za bolj zvezen prikaz odziva zaslona,
- 7500 K je približna barvna temperatura standardizirane svetlobe D75 [13],
- 9300 K pomeni standardizirano belo točko zaslonov po japonskem standardu ARIB TR-B28 [15, 16] ter tovarniško nastavitev bele točke nekaterih zaslonov, vendar ni primerna za uporabo na grafičnem področju. V raziskavo je bila vključena za prikaz, da je lahko vzrok za velike barvne razlike med izmerjenimi in prilagojenimi barvnimi vrednostmi tudi nepravilna kalibracija zaslona in ne uporaba neprimerne modela barvnih prilagoditev.

2.2 Oprema

Za ohranitev stalnih pogojev pri merjenju so bili izdelani profili zaslona pri naštetih belih točkah zaslona z

uporabo baze ArgyllCMS, sistema za barvno upravljanje (avtor Graeme Gill, GNU Affero General Public License) ter programa dispalGUI 1.2.7.0. [17].

Za meritve sta bila uporabljena instrument Spektrofotometer i1 (Eye-One), X-Rite in testna tablica z 238 testnimi polji, ki je del programske opreme dispalGUI.

2.3 Izračuni prilagoditev barv

Meritve pri barvni temperaturi bele točke zaslona 6500K so bile predpostavljene kot referenčne, na katerih se je v nadaljevanju z uporabo treh različnih modelov barvnih prilagoditev izvedla prilagoditev barvnih vrednosti polj k preostalim petim nastavitvam barvnih temperatur belih točk zaslona. Vsi uporabljeni modeli imajo preprosto matrično zgradbo, brez dodatnih korekcijskih faktorjev:

- **Bradfordska matrika in inverzna bradfordska matrika** [18]

Matrika (en. (1) in en. (2)) je bila uporabljena za izračun prilagojenih CIEXYZ vrednosti po bradfordskem modelu barvnih prilagoditev.

$$M_{BF} = \begin{vmatrix} 0,895100 & 0,266400 & -0,161400 \\ -0,750200 & 1,713500 & 0,036700 \\ 0,038900 & -0,068500 & 1,029600 \end{vmatrix} \quad (1)$$

$$M_{BF}^{-1} = \begin{vmatrix} 0,986993 & 0,147054 & -0,159963 \\ 0,432305 & 0,518360 & 0,049291 \\ 0,008529 & 0,040043 & 0,968487 \end{vmatrix} \quad (2)$$

- **Von Kriesova matrika in inverzna von Kriesova matrika** [18]

Matrika (en. (3) in en. (4)) je bila uporabljena za izračun prilagojenih CIEXYZ vrednosti po von Kriesovem modelu barvnih prilagoditev.

$$M_{VK} = \begin{vmatrix} 0,400240 & 0,707600 & -0,080810 \\ 0,226300 & 1,16532 & 0,045700 \\ 0,000000 & 0,000000 & 0,918220 \end{vmatrix} \quad (3)$$

$$M_{VK}^{-1} = \begin{vmatrix} 1,859936 & -1,129382 & 0,219897 \\ 0,361191 & 0,638813 & -0,000006 \\ 0,000000 & 0,000000 & 1,089064 \end{vmatrix} \quad (4)$$

- **Matrika XYZ Scaling in inverzna matrika XYZ Scaling** [18]

Matrika (en. (5) in en. (6)) je bila uporabljena za izračun prilagojenih vrednosti CIEXYZ po modelu XYZ Scaling barvnih prilagoditev.

$$M_{XYZ} = \begin{vmatrix} 1,000000 & 0,000000 & 0,000000 \\ 0,000000 & 1,000000 & 0,000000 \\ 0,000000 & 0,000000 & 1,000000 \end{vmatrix} \quad (5)$$

$$M_{XYZ}^{-1} = \begin{vmatrix} 1,000000 & 0,000000 & 0,000000 \\ 0,000000 & 1,000000 & 0,000000 \\ 0,000000 & 0,000000 & 1,000000 \end{vmatrix} \quad (6)$$

Postopek izračuna prilagojenih barvnih vrednosti po modelih barvnih prilagoditev ima naslednje korake [1, 17]:

Izmerjene vrednosti izhodiščnega svetlobnega vira CIEXYZ (angl. source white $X_{sw}Y_{sw}Z_{sw}$) in ciljnega svetlobnega vira (angl. destination white $X_{dw}Y_{dw}Z_{dw}$) pomnožimo z matriko ustreznega modela barvnih prilagoditev, da dobimo $R_{sw}G_{sw}B_{sw}$ in $R_{dw}G_{dw}B_{dw}$ za izhodiščni in ciljni svetlobni vir (en. (7) in en. (8)).

$$\begin{vmatrix} R_{sw} \\ G_{sw} \\ B_{sw} \end{vmatrix} = [M] \times \begin{vmatrix} X_{sw} \\ Y_{sw} \\ Z_{sw} \end{vmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{vmatrix} R_{dw} \\ G_{dw} \\ B_{dw} \end{vmatrix} = [M] \times \begin{vmatrix} X_{dw} \\ Y_{dw} \\ Z_{dw} \end{vmatrix} \quad (8)$$

Izračunane $R_{sw}G_{sw}B_{sw}$ in $R_{dw}G_{dw}B_{dw}$ uporabimo za izračun diagonalne matrike, ki prilagodi vrednosti testnih polj CIEXYZ glede na svetlobne vire:

$$\begin{vmatrix} \frac{R_{dw}}{R_{sw}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{G_{dw}}{G_{sw}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{B_{dw}}{B_{sw}} \end{vmatrix} \quad (9)$$

Izmerjene vrednosti testnih polj CIEXYZ pod izhodiščnim svetlobnim virom prilagodimo vrednosti X'Y'Z' pod ciljnim svetlobnim virom, tako da jih pomnožimo z matriko in inverzno matriko modela barvnih prilagoditev ter z izdelano diagonalno matriko za par svetlobnih virov oz. belih točk:

$$\begin{vmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{vmatrix} = [M] \times \begin{vmatrix} \frac{R_{dw}}{R_{sw}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{G_{dw}}{G_{sw}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{B_{dw}}{B_{sw}} \end{vmatrix} \times [M^{-1}] \begin{vmatrix} X \\ Y \\ Z \end{vmatrix} \quad (10)$$

Za ovrednotenje delovanja vsakega modela barvnih prilagoditev so bile izračunane barvne razlike med izmerjenimi in prilagojenimi vrednostmi barvnih polj CIEXYZ pri določeni barvni temperaturi bele točke zaslona.

S formulama en. (11) in en. (12) je bila izračunana barvna razlika, ki je bila uporabljena za vrednotenje delovanja vsakega modela barvnih prilagoditev.

$$\Delta E_{ab}^* = \sqrt{\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}}, \tag{11}$$

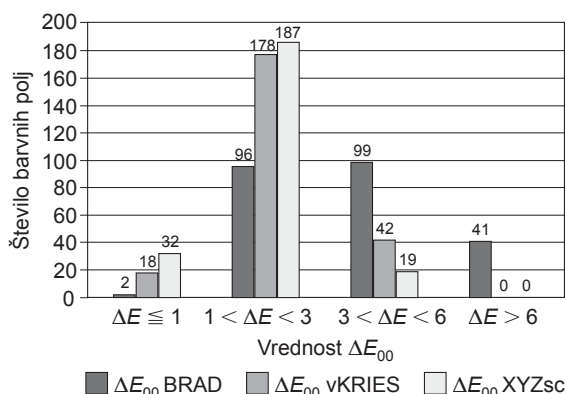
kjer je ΔL^* razlika v svetlosti, Δa^* razlika glede na rdeče-zeleno os in b^* razlika glede na rumeno-modro os.

$$\Delta E_{00} = \left[\left(\frac{\Delta L'}{k_L S_L} \right)^2 + \left(\frac{\Delta C'}{k_C S_C} \right)^2 + \left(\frac{\Delta H'}{k_H S_H} \right)^2 + R_T \left(\frac{\Delta C'}{k_C S_C} \right)^2 + \left(\frac{\Delta H'}{k_H S_H} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \tag{12}$$

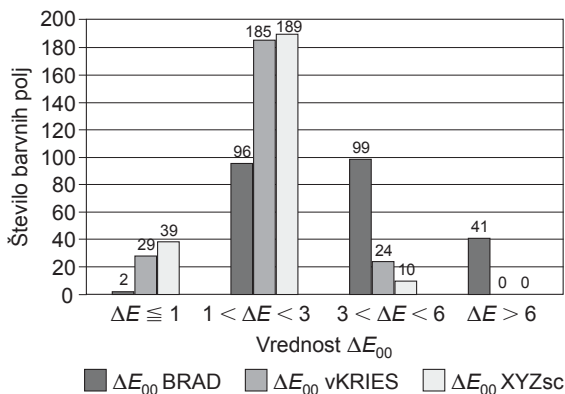
kjer se simboli L , C in H nanašajo na svetlost, kromo in barvni ton. Posamezni členi enačbe torej upoštevajo dodatne korekcije glede na svetlost, kromo in barvni ton, R_T pa se nanaša na korekcijo orientacije elips v modrem območju. Izračuni so bili izvedeni, kot je opisano v [19].

3 Rezultati z razpravo

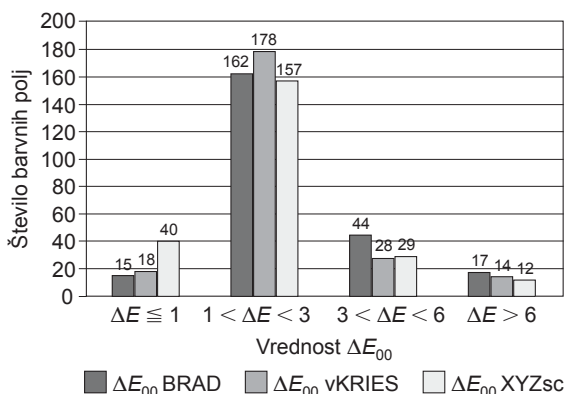
V poglavjih z rezultati so bili izdelani stolpčni grafi (slike 1–5), ki prikazujejo velikostne razrede barvnih razlik med prilagojenimi vrednostmi CIEXYZ in izmerjenimi vrednostmi CIEXYZ pri pripadajoči beli točki zaslona.



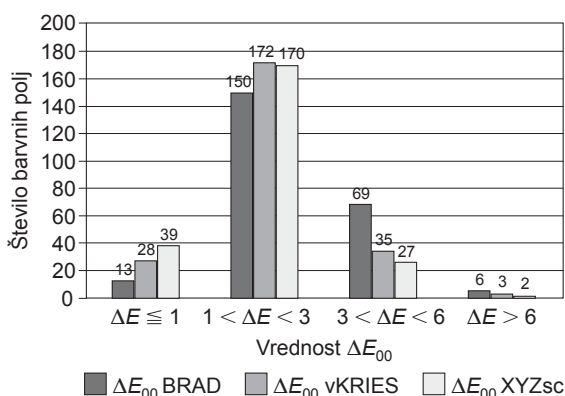
Slika 1: Prikaz velikostne razporeditve barvnih razlik ΔE_{00} z bradfordsko, von Kriesovo in XYZ Scaling matriko pri 5000 K



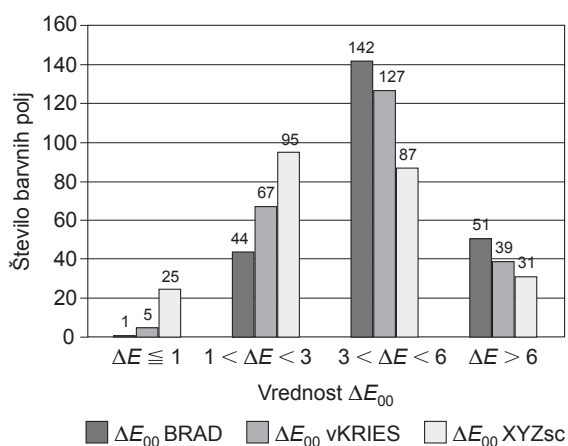
Slika 2: Prikaz velikostne razporeditve barvnih razlik ΔE_{00} z bradfordsko, von Kriesovo matriko in matriko XYZ Scaling pri 5500 K



Slika 3: Prikaz velikostne razporeditve barvnih razlik ΔE_{00} z bradfordsko, von Kriesovo in XYZ Scaling matriko pri 7000 K



Slika 4: Prikaz velikostne razporeditve barvnih razlik ΔE_{00} z bradfordsko, von Kriesovo in XYZ Scaling matriko pri 7500 K



Slika 5: Prikaz velikostne razporeditve barvnih razlik ΔE_{00} z bradfordsko, von Kriesovo in XYZ Scaling matriko pri 9300 K

Trditev, da je z modeli barvnih prilagoditev mogoče napovedati prikaz barv na zaslonu, je lahko potrjena, če modeli barvnih prilagoditev dajo dovolj barvnih polj, katerih izračunane barvne razlike so manjše od 3, torej neopazne z očesom (do 1), ali majhne razlike (od 1 do 3). Pregled rezultatov pokaže, da so vrednosti barvnih razlik res zgoščene v nižjih vrednostih do 3 ter da število barvnih polj z nizko vrednostjo barvnih razlik, z izjemo barvnih razlik pri paru belih točk 6500 K – 9300 K, presega polovico števila testnih polj. Iz tega lahko povzamemo, da se z modeli barvnih prilagoditev lahko napove prikaz barve na zaslonu.

Barvne razlike ΔE_{ab}^* in ΔE_{00} , izračunane po treh različnih modelih barvnih prilagoditev, so bile primerjane glede na različne parametre (minimum, maksimum, povprečje, mediana in standardni odklon), ki so predstavljeni v preglednicah 1–5.

Preglednica 1: Vrednosti barvnih razlik med izmerjenimi in prilagojenimi vrednostmi CIEXYZ pri barvni temperaturi 5000 K

6500 K–5000 K	Bradfordski model		Von Kriesov model		Model XYZ Scaling	
	ΔE_{ab}^*	ΔE_{00}	ΔE_{ab}^*	ΔE_{00}	ΔE_{ab}^*	ΔE_{00}
Minimum	0,74	0,33	0,59	0,43	0,00	0,00
Maksimum	12,08	11,03	8,68	4,56	9,98	4,84
Povprečje	6,83	4,02	4,00	2,17	3,79	1,84
Mediana	6,87	3,40	3,64	2,04	3,26	1,79
Standardni odklon	2,11	2,25	1,94	0,84	2,31	0,81

Preglednica 2: Vrednosti barvnih razlik med izmerjenimi in prilagojenimi vrednostmi CIEXYZ pri barvni temperaturi 5500 K

6500 K–5500 K	Bradfordski model		Von Kriesov model		Model XYZ Scaling	
	ΔE_{ab}^*	ΔE_{00}	ΔE_{ab}^*	ΔE_{00}	ΔE_{ab}^*	ΔE_{00}
Minimum	0,44	0,43	0,43	0,41	0,00	0,00
Maksimum	10,60	9,48	9,64	4,59	10,67	5,00
Povprečje	5,21	3,09	3,76	2,01	3,57	1,73
Mediana	5,15	2,48	3,31	1,95	3,25	1,72
Standardni odklon	2,12	1,90	1,95	0,82	2,16	0,79

Preglednica 3: Vrednosti barvnih razlik med izmerjenimi in prilagojenimi vrednostmi CIEXYZ pri barvni temperaturi 7000 K

6500 K–7000 K	Bradfordski model		Von Kriesov model		Model XYZ Scaling	
	ΔE_{ab}^*	ΔE_{00}	ΔE_{ab}^*	ΔE_{00}	ΔE_{ab}^*	ΔE_{00}
Minimum	0,17	0,25	0,15	0,21	0,00	0,00
Maksimum	21,29	10,41	20,70	10,02	20,08	9,69
Povprečje	5,27	2,72	5,02	2,47	4,86	2,27
Mediana	4,06	2,31	3,97	2,08	4,07	2,02
Standardni odklon	3,76	1,72	3,67	1,64	3,62	1,64

Preglednica 4: Vrednosti barvnih razlik med izmerjenimi in prilagojenimi vrednostmi CIEXYZ pri barvni temperaturi 7500 K

6500 K–7500 K	Bradfordski model		Von Kriesov model		Model XYZ Scaling	
	ΔE_{ab}^*	ΔE_{00}	ΔE_{ab}^*	ΔE_{00}	ΔE_{ab}^*	ΔE_{00}
Minimum	0,21	0,25	0,19	0,20	0,00	0,00
Maksimum	19,24	8,63	18,22	7,93	16,99	7,29
Povprečje	4,84	2,56	4,10	2,03	3,90	1,90
Mediana	3,94	2,13	3,20	1,76	2,98	1,78
Standardni odklon	2,95	1,42	2,94	1,20	2,85	1,08

Preglednica 5: Vrednosti barvnih razlik med izmerjenimi in prilagojenimi vrednostmi CIEXYZ pri barvni temperaturi 9300 K

6500 K–9300 K	Bradfordski model		Von Kriesov model		Model XYZ Scaling	
	ΔE_{ab}^*	ΔE_{00}	ΔE_{ab}^*	ΔE_{00}	ΔE_{ab}^*	ΔE_{00}
Minimum	0,59	0,60	0,54	0,52	0,00	0,00
Maksimum	33,37	16,51	31,15	15,15	27,97	13,60
Povprečje	10,06	5,02	8,42	4,12	7,43	3,50
Mediana	8,47	4,19	6,52	3,36	6,01	2,93
Standardni odklon	5,93	2,80	5,67	2,52	5,60	2,49

Glede na večino podatkov, ki jih lahko razberemo iz preglednic in slike 1, najboljše rezultate dosega matrika XYZ Scaling, tesno ji sledi von Kriesova matrika, bradfordska matrika pa se je od uporabljenih modelov barvnih prilagoditev odrezala najslabše. Ta ugotovitev je bila glede na pregled raziskav presenetljiva. Predvidevali smo, da bo bradfordska matrika dala najboljše rezultate. Razlog za takšno odstopanje lahko najdemo v dejstvu, da je večina pregledanih strokovnih člankov obravnavala bodisi tiskane reprodukcije barv bodisi primerjavo med prikazom barv na zaslonu in na odtisu. Prav tako so številne raziskave izvajale teste z opazovalci ali pa so uporabljali rezultate vizualnih meritev iz predhodnih raziskav. V naši raziskavi pa so bile meritve izvajane zgolj na zaslonu ter le z uporabo spektrofotometra, saj je bil namen raziskati, kakšen je odziv zaslona ter kako le-ta prikaže čim bolj podobne barve pod različnimi belimi točkami zaslona. Obstojećih raziskav in naše med seboj torej ne moremo neposredno primerjati. To nam tudi ne da odgovora, zakaj najboljše rezultate daje model barvnih prilagoditev modela XYZ Scaling ter zakaj se bradfordski model izmed vseh uporabljenih odreže najslabše. Vzrok se skriva v uporabljenih matrikah. Čeprav je sposobnost barvne prilagoditve človeških čepkov upoštevana že v von Kriesovi matriki, ima bradfordska matrika še bolj korigirane koeficiente. Tako bradfordska matrika bolje

opiše odziv človeškega očesa, kar potrjujejo številne raziskave s testnimi opazovalci [5, 6, 7, 8, 9]. Medtem je oblika matrike XYZ Scaling enostavno-diagonalna in se med preračunom obnaša drugače kot bradfordska in von Kriesova. Zadnji dve matriki med preračunom upoštevata tako prilagoditev barvnih vrednosti glede na izhodiščni in ciljni svetlobni vir kot sposobnost barvne prilagoditve človeškega očesa, ki je integrirana v njunih koeficientih. Zgradba matrike XYZ Scaling pa je preprostejša in upošteva le prilagoditev glede na uporabljeno osvetlitev.

Ker v naši raziskavi niso bili uporabljeni človeški opazovalci, ampak je bil raziskovan zaslon, ki ne premore sposobnosti barvne prilagoditve, je bradfordski model barvnih prilagoditev dal slabše rezultate, model XYZ Scaling, ki v matriki ne upošteva barvne prilagoditve, pa je dal najboljše rezultate. Pri prilagoditvi med 6500–5000 K, 6500–7000 K in 6500–7500 K zelo dobre rezultate daje tudi von Kriesova matrika, saj v manjši meri upošteva barvno prilagoditev kot bradfordska. Bradfordski model barvnih prilagoditev torej ne daje najboljših rezultatov, zato so bila pričakovanja, oblikovana pred izvedbo eksperimentalnega dela, napačna.

Iz preglednic 1–5 je tudi razvidno, da barvne razlike med prilagojenimi in izračunanimi barvnimi vrednostmi rastejo sorazmerno z barvno razliko med izhodiščno in ciljno belo točko.

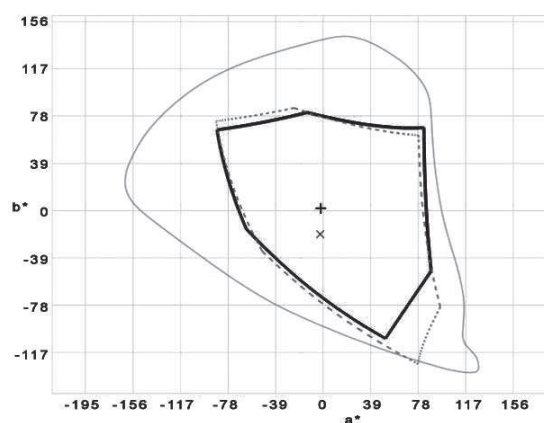
Izračuni barvnih razlik med uporabljenimi belimi točkami zaslona so pokazali, da je barvna razlika največja med parom belih točk 6500–9300 K, tesno pa ji sledi par 6500–5000 K. Najmanjša barvna razlika pa je bila izračunana med 6500 K in 7000 K. Rezultati barvnih razlik med prilagojenimi in izmerjenimi vrednostmi to potrjujejo, saj barvne vrednosti dosegajo največje vrednosti pri paru belih točk 6500–9300 K z doseženim največjim maksimumom barvne razlike 33,37. Glede na povprečne vrednosti je drug par belih točk z največjimi barvnimi razlikami 6500–5000 K. Najmanjše pa so barvne razlike pri parih 6500–7000 K in 6500–7500 K. Rezultati so potrdili domnevo, da barvne razlike rastejo sorazmerno z barvno razliko med izhodiščno in ciljno belo točko. V rezultatih se kaže še en trend, in sicer: pri

preračunih iz referenčne bele točke 6500 K v višje vrednosti belih točk prihaja do večjih vrednosti maksimumov barvnih razlik kot pri preračunu v nižje vrednosti belih točk. To je verjetno posledica večjih razlik v barvnih prostorih barvnih profilov zaslona (slike 6–11).

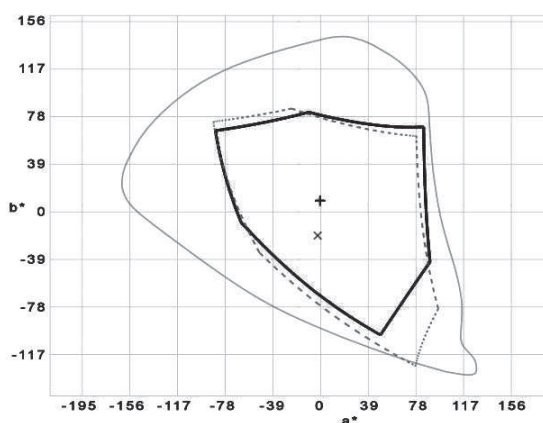
Barvni obsegi izdelanih profilov zaslona, prikazanih v slikah 6–11, se spreminjajo v skladu s pričakovanji glede na uporabljene različne bele točke zaslona. Z naraščanjem vrednosti barvne temperature bele točke zaslona se zmanjšuje barvni obseg v rdečem in zelenem območju, povečuje pa se barvni obseg v cian-modro-vijoličastem območju. Pri nižjih barvnih temperaturah belih točk zaslona od referenčne 6500 K pa je opazen ravno nasproten trend, saj je barvni obseg v rdeče-rumeno-zelenih



Slika 6: Primerjava med barvnim prostorom sRGB IEC19662.1 (črtkana črta) in barvnim prostorom zaslona z nastavljenjo belo točko 6500 K (polna črta)



Slika 8: Primerjava med barvnim prostorom sRGB IEC19662.1 (črtkana črta) in barvnim prostorom zaslona z nastavljenjo belo točko 5500 K (polna črta)



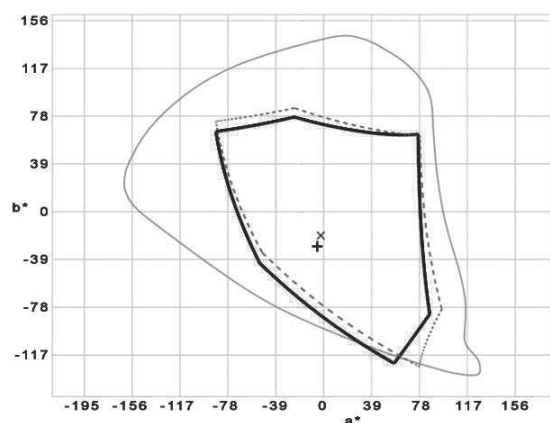
Slika 7: Primerjava med barvnim prostorom sRGB IEC19662.1 (črtkana črta) in barvnim prostorom zaslona z nastavljenjo belo točko 5000 K (polna črta)



Slika 9: Primerjava med barvnim prostorom sRGB IEC19662.1 (črtkana črta) in barvnim prostorom zaslona z nastavljenjo belo točko 7000 K (polna črta)



Slika 10: Primerjava med barvnim prostorom sRGB IEC19662.1 (črtkana črta) in barvnim prostorom zaslona z nastavljenjo belo točko 7500 K (polna črta)



Slika 11: Primerjava med barvnim prostorom sRGB IEC19662.1 (črtkana črta) in barvnim prostorom zaslona z nastavljenjo belo točko 9300 K (polna črta)

območjih večji, v cian-modro-vijoličastih pa manjši kot pri referenčnem profilu. Slike prikazujejo največje odstopanje skladnosti ravno pri parih 6500–5000 K in 6500–9300 K, najmanjše pa pri paru 6500–7000 K.

4 Sklepi

Namen naše raziskave je bil ugotoviti, ali lahko z modelom barvnih prilagoditev napovemo prikaz barv na zaslonu, ter določiti, kateri model barvnih prilagoditev daje najboljše rezultate. Rezultati izračunanih barvnih razlik med izmerjenimi in izračunanimi vrednostmi XYZ so pokazali veliko majhnih

barvnih razlik (vrednosti pod 3), za vse pare belih točk. Iz tega lahko povzamemo, da lahko z modeli barvnih prilagoditev zadovoljivo opišemo prikaz barv na zaslonu.

Največ nizkih vrednosti barvnih razlik (pod 3) je bilo doseženih z uporabo modela barvnih prilagoditev XYZ Scaling, ki ima najpreprostejšo obliko matrike in preslika barvne vrednosti le glede na uporabljeno svetlobo oziroma bele točke zaslona. Dobri rezultati so bili doseženi tudi z von Kriesovim modelom, najslabše pa se je odrezal bradfordski model, ki od vseh uporabljenih modelov do največje mere upošteva odziv čepkov in sposobnost barvne prilagoditve človeka. Dokazano je bilo, da barvne razlike med prilagojenimi in izračunanimi barvnimi vrednostmi rastejo sorazmerno z barvno razliko med izhodiščno in ciljno belo točko. Največje vrednosti barvnih razlik so bile izračunane pri paru belih točk 6500–9300 K, ki imata tudi največjo medsebojno barvno razliko, najmanjše vrednosti pa so bile izračunane pri paru belih točk 6500–7000 K.

Nazadnje pa je bilo pokazano tudi, da je razporeditev velikosti vrednosti barvnih razlik glede na barvo, svetlost in kromo odvisna od uporabljenega modela barvnih prilagoditev, saj različni modeli barvnih prilagoditev dobro prilagodijo različne barve glede na njihove lastnosti.

Bradfordski model barvnih prilagoditev daje največje vrednosti barvnih razlik med izmerjenimi in prilagojenimi barvnimi vrednostmi. Najslabše prilagodi svetle barve ter modre barve, srednjih svetlosti in visoke krome, najboljše pa temne barve. Von Kriesov model daje boljše rezultate kot bradfordski in je primerljiv z najboljšim modelom XYZ Scaling. Najslabše prilagodi modre barve, srednjih svetlosti in visokih krom, najboljše pa temne barve. Model barvnih prilagoditev XYZ Scaling daje najboljše rezultate. Najslabše opiše modre barve, srednjih svetlosti in visokih krom, najboljše pa zelo svetle in temne barve, treba pa je poudariti, da model dobro prilagodi tudi druge barve in daje povprečno najnižje vrednosti, zato velja za najprimernejšega za uporabo.

Vsi rezultati torej kažejo, da se prikaz barv na zaslonu lahko napove z uporabo modelov barvnih prilagoditev ter da barvni odziv zaslona najboljše opiše najpreprostejši model barvnih prilagoditev XYZ Scaling.

Pridobljene ugotovitve raziskave so uporabne za razumevanje delovanja modelov barvnih prilagoditev, ki opisujejo človeško zmožnost barvne prilagoditve,

na zaslonu. Rezultati se lahko aplicirajo v praksi v okoljih, kjer je potreben čim bolj korekten prikaz barv na zaslonu, kot na primer v elektronski grafični pripravi za tisk, v tekstilstvu pri digitalnem oblikovanju in tudi pri prikazu tekstilnih in grafičnih izdelkov v spletnih trgovinah.

Viri

1. FAIRCHILD, Mark D. *Color appearance models. Second edition*. Chichester: John Wiley & Sons, 2006. 385 str.
2. SIST ISO 12646:2010/Dod 1:2014 *Grafična tehnologija – Zasloni za barvno preskušanje – Značilnosti in pogoji za vizualno opazovanje – Dodatek 1*. 18 str.
3. Chromatic adaptation. V Wikipedija: the free encyclopedia [dostopno na daljavo]. Obnovljeno 21. maj 2013 [citirano 23. 6. 2013]. Dostopno na svetovnem spletu: <https://en.wikipedia.org/wiki/Chromatic_adaptation>.
4. *Digital color imaging handbook*. Uredil Gaurav Sharma. Boca Raton [etc.]: CRC Press, 2003, 56–57.
5. FINLAYSON, Graham D. in SÜSSTRUNK, Sabine. Spectral sharpening and the Bradford transform [dostopno na daljavo]. Obnovljeno 7. julij 2011 [citirano 15. 7. 2013]. Dostopno na svetovnem spletu: <<http://infoscience.epfl.ch/record/34077/files/FinlaysonS00.pdf>>.
6. SÜSSTRUNK, Sabine, HOLMB, Jack in FINLAYSON, Graham D. Chromatic adaptation performance of different RGB sensors [dostopno na daljavo]. Obnovljeno 9. julij 2011 [citirano 20. 6. 2013]. Dostopno na svetovnem spletu: <<http://infoscience.epfl.ch/record/34049/files/SusstrunkFH01.pdf>>.
7. ĐORĐEVIĆ, Dejana, JAVORŠEK, Andrej in HLADNIK, Aleš. Primerjava CMCCAT2000 in bradfordskega modela kromatične prilagoditve. *Tekstilec*, 2009, 52(4–6), 91–101.
8. ĐORĐEVIĆ, Dejana, JAVORŠEK, Andrej in HLADNIK, Aleš. Performance of five chromatic adaptation transforms using large number of color patches. *Acta graphica*, 2009, 20(1/4), 9–19.
9. ĐORĐEVIĆ, Dejana, JAVORŠEK, Andrej in HLADNIK, Aleš. Comparison of chromatic adaptation transforms used in textile printing sample preparation. *Coloration Technology*, 2010, 126(5), 275–281, <http://dx.doi.org/10.1111/j.1478-4408.2010.00258.x>.
10. WESTLAND, Stephen in RIPAMONTI, Caterina. *Computational color science: using matlab*. Chichester: John Wiley & Sons, 2004. 207 str.
11. LINDBLOOM, Bruce. *Bruce Lindbloom.com* [dostopno na daljavo]. Obnovljeno 24. marec 2008 [citirano 12. 7. 2013]. Dostopno na svetovnem spletu: <<http://www.brucelindbloom.com/>>.
12. KATOH, Naoya in NAKABAYASHI, Kiyotaka. Applying mixed adaptation to various chromatic adaptation transformation (CAT) models [dostopno na daljavo]. Obnovljeno 18. oktober 2011 [citirano 7. 7. 2013]. Dostopno na svetovnem spletu: <http://pdf.aminer.org/000/540/731/applying_mixed_adaptation_to_various_chromatic_adaptation_transformation_cat_models.pdf>.
13. *CIE 15:2004. 3rd edition. Technical report. Colorimetry*. Washington, D.C.: International Commission on Illumination, 2004, 71 str.
14. HUNT, Robert W. in POINTER, Michael R. *Measuring Colour: Fourth Edition*. Chichester: John Wiley & Sons, 2011. 469 str.
15. User requirements for a flat panel display (FPD) as master monitor in an HDTV programme production environment (2008). [dostopno na daljavo]. BT Series, Broadcasting service (television). Report ITU-R BT.2129 (05/2009) [citirano 2. 8. 2013]. Dostopno na svetovnem spletu: <http://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-BT.2129-2008-PDF-E.pdf>.
16. Altering color dramatically with a single setting: examining color temperature on an LCD monitor. EIZO Corporation [dostopno na daljavo]. Obnovljeno 30. marec 2009 [citirano 22. 7. 2013]. Dostopno na svetovnem spletu: <http://www.eizo.com/global/library/basics/color_temperature_on_an_LCD_monitor/>.
17. PASCALE, Dänny. *A Review of RGB color spaces ...from xyY to R'G'B'*. Montreal: The Babel-Color [dostopno na daljavo]. Obnovljeno 10. januar 2011 [citirano 26. 6. 2013]. Dostopno na svetovnem spletu: <<http://www.babelcolor.com/download/A%20review%20of%20RGB%20color%20spaces.pdf>>.
18. SIST ISO 3664:2011 *Grafična tehnologija in fotografija - Pogoji za vizualno opazovanje*. 33 str.
19. BRAČKO, Sabina in ĐORĐEVIĆ, Dejana. *Merjenje barv: vaje*. Ljubljana: Naravoslovnotehniška fakulteta, Oddelek za tekstilstvo, 43 str.