

PERSONALIZIRAN PRIKAZ DIGITALNIH SLIK ZA RAZLIČNE VRSTE BARVNE SLEPOTE

ŽIGA VINČEC, BOŽIDAR POTOČNIK, MARTIN ŠAVC

Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko,
Maribor, Slovenija
ziga.vincec@student.um.si, bozidar.potocnik@um.si, martin.savc@um.si

Barvna slepota pomeni nezmožnost razlikovanja določenih barv ali odtenkov, ki jih ljudje z normalnim barvnim vidom zlahka prepoznajo. V članku je predstavljena programska rešitev, ki barvno slepim omogoča personalizirano prilagoditev digitalnih slik in tako olajša njihove vsakodnevne izzive. Namen rešitve je uporabniku omogočiti razumevanje vizualnega konteksta ob čim manjšem posegu v izvirno sliko. Rešitev vsebuje hiter test, s katerim določimo, katere barve so za uporabnika konfuzne. Prebarvanje je vsebinsko odvisno. Iz slike izluščimo reprezentativne barvne centre in na podlagi testa barvne slepote prepoznamo barvne pare, ki jih uporabnik težko razlikuje. Za konfuzne barvne centre z optimizacijskim postopkom poiščemo nadomestne barve, ki najmanj spremenijo videz slike, tako da se ti segmenti prilagodijo in postanejo uporabniku jasno razločljivi. Dobljeni rezultati so obetajoči.

DOI

[https://doi.org/
10.18690/um.feri.4.2026.9](https://doi.org/10.18690/um.feri.4.2026.9)

ISBN

978-961-299-111-1

Ključne besede:

barvna slepota,
daltonizacija,
personalizacija,
prebarvanje digitalnih slik,
programska oprema

Prispevek temelji na:

Vinčec, Ž. (2025).
*Personaliziran prikaz
digitalnih slik za različne vrste
barvne slepote z metodo
daltonizacije: magistrsko delo*,
Univerza v Mariboru,
Fakulteta za
elektrotehniko,
računalništvo in
informatiko, Maribor.



Univerzitetna založba
Univerze v Mariboru

DOI
[https://doi.org/
10.18690/um.feri.4.2026.9](https://doi.org/10.18690/um.feri.4.2026.9)

ISBN
978-961-299-111-1

Keywords:

colour vision deficiency,
daltonization method,
personalisation,
digital image recolouring,
software

The paper is based on:
Vinčec, Ž. (2025).

*Personaliziran prikaz digitalnih
slik za različne vrste barne
slepote z metodo daltonizacije;*
*master's thesis, University of
Maribor, Faculty of
Electrical Engineering and
Computer Science, Maribor.*

PERSONALIZED DIGITAL IMAGE DISPLAY FOR VARIOUS TYPES OF COLOUR VISION DEFICIENCIES

ŽIGA VINČEC, BOŽIDAR POTOČNIK, MARTIN ŠAVC

University of Maribor, Faculty of electrical engineering and computer science ,
Maribor, Slovenia
ziga.vincec@student.um.si, bozidar.potocnik@um.si, martin.savc@um.si

Colour vision deficiency is the inability to distinguish certain colours or shades that people with normal colour vision can easily recognize. This article presents a software solution that allows individuals with colour vision deficiency to personalize digital images, thereby facilitating their daily challenges. The purpose of the solution is to enable users to understand the visual context with minimal interference to the original image. The solution includes a quick test to determine which colours are confusing to the user. The recolouring is content-dependent. We extract representative colour centres from the image and, based on the colour blindness test, identify colour pairs that are difficult for the user to distinguish. For confusing colour centres, we use an optimization process to find replacement colours that change the appearance of the image as little as possible and at the same time adjust the confusing segments so that they become clearly distinguishable to the user. The results obtained are promising.



University of Maribor Press

1 Uvod

Daltonizem oziroma barvna slepota je dedna in neozdravljiva motnja zaznavanja barv, ki se med posamezniki močno razlikuje. Lahko se kaže kot blaga težava pri razlikovanju nekaterih barvnih odtenkov ali kot popolna barvna slepota, pri kateri oseba vidi le sivinske odtenke (Fairchild, 2005). Ker barve v digitalnih vsebinah pogosto nosijo ključne informacije, lahko neprilagojene barvne sheme barvno slepim otežijo ali onemogočijo razumevanje podatkov. To je posebej izrazito pri zemljevidih, grafih in signalizaciji, kjer napačna izbira barv povzroča zmedo ali celo napačno interpretacijo – še posebej pri rdeče-zelenih kombinacijah, ki so za najpogostejšo obliko barvne slepote najbolj problematične. Večina barvno slepih ne pozna natančne vrste svoje motnje, zato morajo rešitve za prilagajanje digitalnih vsebin vključevati test, ki to zanesljivo določi. V članku predstavljamo pristop za personalizirano prilagajanje digitalnih slik, ki temelji na izokromatskih tablicah. Z njimi določimo osem diskriminatornih limit, kjer barve preidejo iz neločljivih v ločljive. Iz teh limit nato oblikujemo personaliziran globalni elipsoid, s katerim opredelimo barve, ki so za uporabnika konfuzne – ne glede na vrsto barvne slepote, zaslon ali vpliv okolja.

Postopek prebarvanja slike poteka v štirih korakih. Najprej z optimizirano različico algoritma Mean Shift določimo reprezentativni nabor barv, ki najbolje opiše barvno paleto slike. Nato s pomočjo personaliziranega elipsoida, izpeljanega iz rezultatov testa, prepoznamo konfuzne barvne centre. Med njimi izberemo tiste, katerih sprememba najmanj vpliva na videz slike, in jim z optimizacijskim postopkom poiščemo nadomestne barve, ki minimalno odstopajo od izvirnih. Tako omogočimo, da barvno slepi barve jasno razlikujejo, hkrati pa ohranimo prepoznavnost slike. V zadnjem koraku vsakemu pikslu nove slike določimo ustrezno barvo: piksli nekonfuznih centrov ohranijo izvirne barve, medtem ko piksle optimiziranih centrov obarvamo glede na njihovo razdaljo od centra. S tem se izognemo nenadnim barvnim prehodom in ohranimo naraven videz slike.

2 Medicinsko ozadje

Povprečen človek zaznava svetlobo med 400 in 700 nm, kar omogoča prepoznavanje tisočih barv. Barvni vid temelji na treh vrstah čepnic – S (angl. short), M (angl. medium) in L (angl. long) – ki so občutljive na različna območja valovnih

dolžin. Njihovi signali se najprej združijo v splošni signal svetlosti, nato pa primerjajo, kar ustvari dva nasprotna barvna kanala: rdeče-zelenega (primerjava čepnic L in M) ter rumeno-modrega (primerjava kombinacije M+L s signalom čepnic S) (Nathans, 1999). Barvni vid ni enak pri vseh ljudeh, saj so pogoste različne oblike barvne slepote (glej tabelo 1). Pri najhujši, monokromatiji paličic, so vse tri vrste čepnic močno okvarjene ali nefunkcionalne, zato oseba vidi le sivinske odtenke. Podobno je pri monokromatiji čepnic, kjer deluje le ena vrsta čepnic, kar pomeni zaznavo le ene barvne osi. Obe obliki sta izjemno redki, zato je njihova pogostost težko natančno določljiva. Dikromatija je blažja oblika barvne slepote, pri kateri zaradi odsotnosti pigmenta v eni vrsti čepnic barvni vid deluje, a je bistveno okrnjen. Poznamo tri vrste: tritanopijo (nefunkcionalne čepnice S), pri kateri so težavni modro-rumeni odtenki, ter deuteranopijo in protanopijo (okvarjene čepnice M oziroma L), kjer odpove rdeče-zeleni barvni kanal (Simunovic, 2009). Deuteranopija in protanopija sta med najpogostejšimi oblikami barvne slepote in prizadeneta nekaj več kot 2 % ljudi.

Anomalna trikromatija je najpogostejša oblika barvne slepote, saj jo ima okoli tri četrtine barvno slepih. Vse tri vrste čepnic delujejo, vendar je ena spektralno premaknjena, zato je razlikovanje barv oslABLJENO — od skoraj normalnega vida do stanj, ki se približajo dikromatiji (Hunt, 2011). Poznamo tri oblike: tritanomalijo (oslABLJENE čepnice S), protanomalijo (premik čepnic L proti nižjim valovnim dolžinam) in deuteranomalijo (premik čepnic M proti višjim). Večje kot je prekrivanje krivulj, več barvnih odtenkov postane konfuznih.

Tabela 1: Statistika pojavitve vrst barvne slepote (vir: (Hunt, 2011))

Tip	Pogostost pojavitve (%)	
	Moški	Ženske
Deuteranomalija	4,9	0,38
Protanomalija	1,0	0,02
Deuteranopija	1,1	0,01
Protanopija	1,0	0,02
Tritanopija	0,002	0,001

3 Pregled obstoječih metod

Daltonizacija označuje postopke prebarvanja slik za barvno slepe. Vsebinsko neodvisne metode globalno prilagajajo piksele, so hitre in primerne za dikromate, vendar pogosto preveč spremenijo barve in niso ustrezne za anomalne trikromate.

Vsebinsko odvisne metode upoštevajo lokalno strukturo slike, zato dajejo boljše rezultate, a so računsko zahtevnejše. Kljub prilagoditvam ostaja izziv ohranjanja naravnega videza, zlasti pri blagih oblikah anomalne trikromatije.

Milić v (Milić, 2016) in Flatla v (Flatla, 2013) sta poskušala izboljšati vsebinsko odvisne daltonizacijske metode z vključitvijo testa barvne slepote in postopkom prebarvanja, ki ohranja naraven videz slike. Oba pristopa temeljita na treh korakih: segmentaciji slike v barvne centre, prepoznavanju konfuznih centrov in iskanju ustreznih premikov barv. Test Nade Milić določa konfuzne limite vzdolž glavnih linij konfuznosti v desetih diskretnih korakih, kar omogoča hitro, a manj natančno določitev globalne elipse. Segmentacija je izvedena z algoritmom K-povprečij, pri čemer upošteva le odtенок in nasičenost.

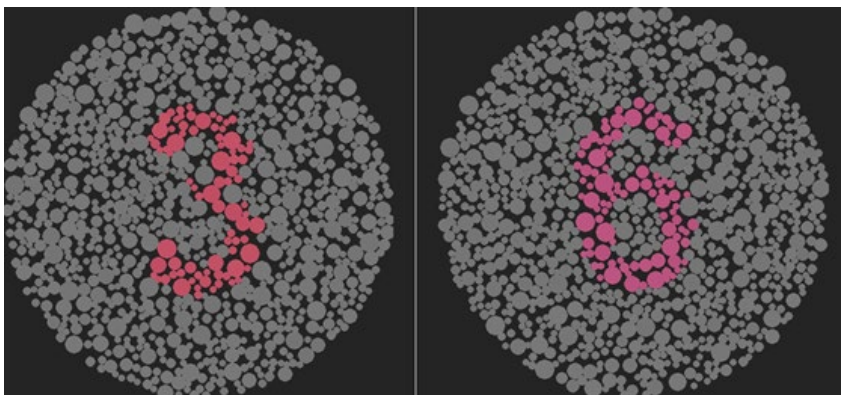
Prebarvanje barvnih centrov je odvisno od vrste barvne slepote. Pri dikromatiji in težjih oblikah anomalne trikromatije se uporabi tipska daltonizacija, kjer se centri prerazporedijo tako, da so čim bolj razmaknjeni, premiki pa potekajo pravokotno na linije konfuznosti. Pri blažjih oblikah se uporabi jakostna daltonizacija, kjer velikost premika določa globalna elipsa; centri na isti elipsi se premaknejo tako, da znotraj ostane le eden. Piksli se nato prebarvajo z ohranjanjem razmerij med barvami. Milić izpostavi, da veliko število centrov vodi v prekrivanje in slabše rezultate, svetlost pa v postopku ni upoštevana.

Flatla uporablja segmentacijo na podlagi pogostosti posameznih barv, pri čemer del najpogostejših postanejo centri, ki ne vključujejo podobnih odtenkov. To lahko privede do ustvarjanja preveč centrov in izključitve redkejših, a za uporabnika pomembnih barv. Limite barvne slepote določa z binarnim iskanjem po linijah konfuznosti in svetlosti, nato oblikuje globalni elipsoid in kopunkturno točko ter z njima prepozna konfuzne centre. Nadomestne barve poišče s simuliranim ohlajanjem, pri čemer optimizacija išče ravnotežje med ohranjanjem naravnosti in izboljšano razločnostjo. Nekonfuzne barve ostanejo nespremenjene, zato slika ostane naravna za normalnovidne in hkrati bolj razločna za barvno slepe.

4 Predlagana rešitev

4.1 Test barvne slepote z izokromatskimi tablicami

Na podlagi izokromatskih tablic (glej sliko 1) izvedemo test, s katerim določimo barve, ki so za uporabnika konfuzne, ne glede na vrsto barvne slepote ali vpliv okolja. Barvne krogce različnih odtenkov naključno razporedimo po šabloni, pri čemer variramo položaj, velikost in svetlost, da zaznavo omogoča izključno razlika v odtenku. Barve primerjamo v prostoru CIELUV, kjer se razlike dobro ujemajo z zaznavo. Med testom spreminjamo odtenke vzdolž linij konfuznosti in svetlobne osi ter z binarnim iskanjem določimo osem diskriminacijskih limit – točke, kjer barva preide iz neločljive v ločljivo glede na ozadje.



Slika 1: Izokromatske tablice.

Vir: lasten.

Iz izmerjenih limit zgradimo tridimenzionalni globalni elipsoid, kjer velika os predstavlja dominantno vrsto barvne slepote, manjša pa vpliv nedominantnih vrst in okolja. Zaradi uniformnosti barvnega prostora CIELUV lahko elipsoid posplošimo na vse barve v prostoru. Za primerjavo dveh barv namesto premikanja in rotiranja elipsoida transformiramo sekundarno barvo v lokalni koordinatni sistem elipsoida. Najprej izračunamo kot rotacije glede na kopunkturno točko po enačbi (1), kjer sta u^k in v^k koordinati kopunkturne točke, u^* in x^* pa koordinati primarne barve. Iz kota sestavimo rotacijsko matriko (enačba (1)) in z njo rotiramo sekundarno barvo. Nato uporabimo standardno enačbo elipsoida in preverimo, ali transformirana barva leži v njegovi notranjosti – v tem primeru sta barvi konfuzni.

$$\begin{aligned}\Theta &= \arctan(u^k - u^*, v^k - v^*) \\ R &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\Theta) & -\sin(\Theta) \\ 0 & \sin(\Theta) & \cos(\Theta) \end{bmatrix}\end{aligned}\quad (1)$$

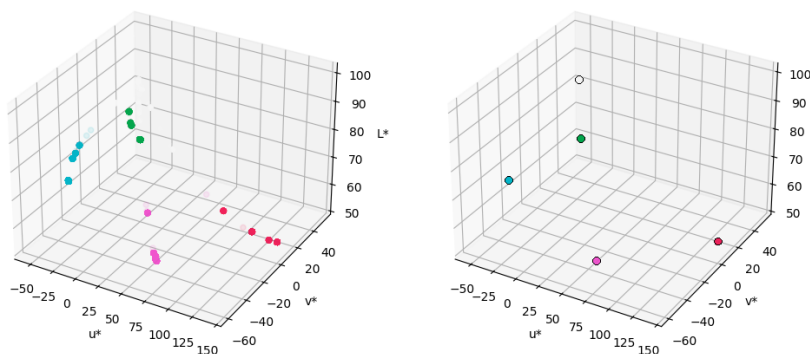
4.2 Prebarvanje slik

Postopek prebarvanja temelji na štirih korakih: i) izbiri reprezentativnih barv, ii) zaznavi konfuznih parov, iii) optimizaciji nadomestnih centrov in iv) rekonstrukciji slike. Ker slika vsebuje veliko barvnih vrednosti, najprej v prostoru CIELUV izvedemo segmentacijo z metodo Mean Shift. Ta iterativno premika točke proti lokalnim maksimumom gostote. Premik je določen z vektorjem iz enačbe (2), kjer $S_h(x)$ predstavlja množico točk v jedru širine h . Ko je premik zanemarljiv, točka doseže stabilno območje gostote, ki postane barvni center.

$$M_h(x) = m_h(x) - x \quad m_h(x) = \frac{1}{|S_h(x)|} \sum_{x_i \in S_h} x_i \quad (2)$$

Postopek pohitrimo z mrežnim grupiranjem barvnega prostora: prostor razdelimo na celice velikosti jedra in v vsaki hranimo le število točk ter vsoto njihovih koordinat, zato se premiki računajo nad celicami namesto nad vsemi piksli. Širino jedra ocenimo iz unikatnih kromatičnih centrov, začetna semena pa neodvisno iščejo lokalne maksimume gostote. Po konvergenci združimo centre, ki so bližje od polovice širine jedra, ter odstranimo majhne segmente. Piksle nato dodelimo najbližjemu centru s postopkom k-najbližjih sosedov (implementacija z drevesom K-D). Rezultat sta kompaktna množica barvnih centrov in pripadnosti pikslov posameznim centrom (glej sliko 2).

V naslednjem koraku med barvnimi centri poiščemo zaznavno nerazločljive pare. Za vsak center ostale centre preslikamo v njegov lokalni koordinatni sistem, orientiran glede na kopunkturno točko dominantne vrste barvne slepote, ter s standardno enačbo elipsoida preverimo, ali ležijo v njegovi notranjosti. Če da, sta barvi konfuzni. Tako dobimo graf zaznavne nerazločnosti, kjer povezave predstavljajo pare barv, ki jih uporabnik ne razlikuje.



Slika 2: Barvne točke slike (levo) in najdeni centri (desno), predstavljeni v barvnem prostoru CIELUV.

Vir: lasten.

Odstranjevanje konfuznosti oblikujemo kot optimizacijski problem premika barvnih centrov v prostoru CIELUV. Novi centri morajo ostati znotraj sRGB in hkrati zunaj elipsoidov vseh drugih centrov, pri čemer zahtevamo razdaljo, večjo od roba elipsoida. Optimizacijo izvedemo v dveh fazah: najprej premaknemo le centre z največ konflikti oziroma najmanjšim deležem pikslov, nato po potrebi vse konfuzne centre. Stroškovna funkcija minimizira vsoto kvadratov premikov, pri čemer je sprememba svetlosti L^* dodatno utežena. Problem rešujemo z metodo SLSQP, ki omogoča upoštevanje nelinearnih omejitev elipsoida in barvnega prostora.

V zadnjem koraku sliko rekonstruiramo tako, da piksli nespremenjenih centrov ohranijo izvirne barve, piksli premaknjenih centrov pa se prebarvajo glede na razdaljo od novega centra v prostoru CIELUV. Piksli blizu centra prevzamejo njegovo novo barvo, bolj oddaljeni pa se premaknejo v smeri vektorja med starim in novim položajem. Takšna interpolacija ohrani lokalne prehode in naraven videz, hkrati pa odstrani vse zaznavno nerazločljive barvne pare.

5 Rezultati in diskusija

Sorodne metode običajno ne poročajo časovne zahtevnosti, kar kaže, da niso zasnovane za realni čas. Flatla (Flatla, 2013) navaja povprečno 0,005 ms na primerjavo, izračunano nad milijonom parov barv RGB. Naša funkcija primerjave barv se uporablja pri iskanju konfuznih parov in znotraj optimizacije SLSQP, zato smo jo pospešili z zgodnjim preverjanjem razlike v svetlosti L^* . Če je ta večja od

krajše polosi elipsoida, nadaljnji izračuni niso potrebni. Meritve nad milijonom parov kažejo bistveno hitrejšo delovanje: na posamezno primerjavo v povprečju približno 0,000105 ms v SLSQP in 0,000314 ms pri samostojnem iskanju, kar pomeni skupno 105,42 ms oziroma 313,81 ms. Pohitritev izhaja iz vektorizacije, zgodnjega preverjanja svetlosti in dejstva, da transformiramo le sekundarno barvo, ne pa celotnega elipsoida.

Za oceno uporabnosti smo preverili vpliv velikosti slike na čas izvajanja. Preizkusili smo 50 slik (npr. naravne scene, zemljevide, Ishiharine tablice) v treh velikostih (400×400, 800×800, 1920×1080), vsako desetkrat. Rezultati (tabela 2) kažejo majhne standardne odklone in približno linearen porast časa glede na število pikslov, kar potrjuje, da na hitrost najbolj vpliva velikost slike. Tudi najdaljši časi ostajajo v območju, ki še omogoča dobro uporabniško izkušnjo.

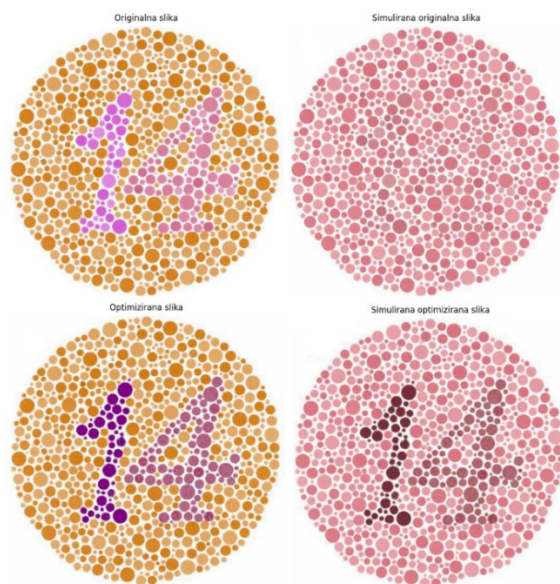
Tabela 2: Hitrost izvedbe postopka daltonizacije glede na velikost slike v pikslih

	400 x 400	800 x 800	1920 x 1080
Povprečni čas	1,15 s	3,72 s	12,53 s
Standardni odklon	0,22 s	0,41 s	1,35 s

Učinkovitost metode smo preverili na tablicah Richmond HRR, kjer barve vzorca in ozadja ležijo na isti liniji konfuznosti in po simulaciji postanejo skoraj enake. Po optimizaciji morajo biti številke razločne tako pred kot po simulaciji. Na testni tablici za tritanopijo (glej sliko 3) original prikazuje oranžno ozadje in škrlatno-rožnate krogce (1 in 4), ki po simulaciji niso več ločljivi. Naša optimizacija številke ponovno jasno razloči tudi po simulaciji, kar potrjuje odpravo konfuznosti. Primer je ilustrativen, saj tablice vsebujejo malo barv in ciljajo predvsem na dikromatijo.

Metodo smo primerjali z rešitvijo Milić (2019) na zemljevidu podzemne železnice s petimi progami (glej sliko 4). Za protanope sta konfuzni progi M1 (RGB: 155,155,25) in M2 (RGB: 85,165,30). Naša segmentacija je določila sedem centrov in zaznala konfuznost le med M1 in M2, zato smo spremenili le barvo M1 v RGB (131,167,100). Sorodna metoda je spremenila več centrov in večji del slike. Razlike smo kvantitativno ocenili s povprečno barvno razliko po enačbi (3), ki meri evklidsko razdaljo med originalnimi in prebarvanimi centri v prostoru CIELUV.

$$\Delta E_{L*u*v*} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta E_{Luv}(c_{1,i}, c_{2,i}) \quad (3)$$



Slika 3: Simulacija tablice Richmond HRR za zaznavanje tritanopije.

Vir: lasten.

V naši metodi se je prebarval le center proge M1 z barvno razliko $\Delta E_{L*u*v*} = 31,91$, povprečje vseh petih prog pa znaša $\Delta E = 6,38$. V sorodni metodi, kjer so bile spremenjene vse proge, povprečje doseže $\Delta E = 45,30$. Čeprav so posamezne spremembe barv manj izrazite, njihovo število močno vpliva na celoten videz slike. Vizualno je razvidno, da naša metoda bistveno manj posega v izvirne barve, hkrati pa ohrani razločljivost prog za barvno slepe opazovalce.

Naravne slike (glej sliko 5) smo vključili zato, ker prav pri njih daltonizacijske metode najtežje ohranijo kakovost. Zaradi velikega števila odtenkov in zveznih prehodov lahko zmanjšanje števila barvnih centrov povzroči opazne preskoke in artefakte. Več centrov bi te težave zmanjšalo, vendar bi močno povečalo časovno zahtevnost zaznavanja konfuznih parov in optimizacije, zato gre za kompromis med kakovostjo in hitrostjo izvajanja.



Slika 4: Primerjava lastne in sorodne rešitve na sliki zemljevida.

Vir: lasten.

6 Sklep

Barvna slepota otežuje dostop do informacij, kadar so te podane z barvami, zato smo predstavili personaliziran pristop daltonizacije, ki temelji na individualnih diskriminacijskih mejah, izmerjenih z izokromatskimi tablicami. Iz teh podatkov v prostoru CIELUV zgradimo globalni elipsoid zaznavne podobnosti, ki omogoča natančno določanje konfuznih barvnih parov in upošteva različne oblike barvne slepote ter vplive okolja. Postopek nato vključuje izbor reprezentativnih barv, zaznavo konfuznih parov, optimizacijo nadomestnih barv z omejitvami prostora sRGB ter končno preslikavo na sliko. Cilj ni le povečanje kontrasta, temveč ohranitev naravnega videza ob hkratni izboljšani razločljivosti informacij.



Slika 5: Primer prebarvanja naravnih slik.

Vir: lasten.

Rezultati kažejo, da naša metoda ponuja bolj uravnoteženo prilagoditev kot splošne rešitve, saj hkrati izboljša razločevanje barv in omeji nepotrebne spremembe. Personaliziran pristop se tako izkaže kot primernejša smer razvoja sistemov za prilagajanje vizualnih vsebin, saj omogoča bolj dostopno in uporabniku prilagojeno okolje.

Viri in literatura

- Fairchild, M. D. (2005). *Color Appearance Models*, 2. izdaja, Chichester: John Wiley & Sons.
- Nathans, J. (1999). The Evolution and Physiology of Human Color Vision: Insights from Molecular Genetic Studies of Visual Pigments. *Nuron*, vol. 24, str. 299-312.
- Simunovic, M. (2009). Color vision deficiency. *Eye*, vol. 24, str. 747-755.
- Hunt, R. W. G. (2011). Pointer, M., *Measuring Color*, 4. izdaja, Chichester: John Wiley & Sons.
- Milić, N. (2016). Model optimizacije slike za korisnike sa poremećajima viđenja boja. Novi Sad: Univerzitet u Novom Sadu Fakultet tehničkih nauka grafičko inženjerstvo i dizajn.
- Flatla, D. R. (2013). Individualized models of color differentiation through situation-specific modelling. Saskatoon: Department of Computer Science University of Saskatchewan Saskatoon.