

Nika Bratuž, Helena Gabrijelčič Tomc, Dejana Javoršek
 Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta, Oddelek za tekstilstvo, grafiko in oblikovanje, Snežniška
 5, 1000 Ljubljana, Slovenija

CIECAM02 pri zaznavanju barv v 3D računalniški grafiki

CIECAM02 and Perception of Colour in 3D Computer Generated Graphics

Pregledni znanstveni članek/Scientific Review

Received/Prispelo 01-2017 • Accepted/Sprejeto 03-2017

Izvleček

Kljub tehnološkemu napredku zadnjih stoletij in desetletij se še vedno soočamo s problematiko prikaza in upodobitve barve v različnih medijih in ohranjanja zaznave barve. Ena od možnosti, za katero se lahko odločimo pri zagotavljanju stalne barvne zaznave, so modeli barvnega zaznavanja. Trenutno je aktualen CIECAM02, ki se še vedno ne uporablja v 3D računalniški grafiki, s katero se vsak dan srečujemo. Namen raziskave je bil pregled barvnih prostorov v 3D računalniški grafiki, pregled reprodukcije barv in materialov, algoritmov za senčenje ter izbranih sodobnih tehnologij upodabljanja za doseganje korektne končne vizualizacije. V nadaljevanju smo želeli proučiti model barvnega zaznavanja CIECAM02 do te mere, da bi ga lahko uporabili v povezavi s 3D računalniško grafiko. V ta namen smo v programu Blender postavili testno sceno in jo upodobili s tremi upodobljevalniki: Blender Render in Cycles, ki sta že vgrajena, in z dodatkom Yafaray. Izkazalo se je, da CIECAM02 lahko uporabimo tudi v 3D prostoru in da z njegovo uporabo dobimo boljše rezultate ujemanja barv pri spremembi ozadja. Poleg tega smo ugotovili, da barv ne upodabljaajo vsi upodobljevalniki enako. Omenjena raziskava je aktualna za vse, ki želijo svoje dvo- ali tridimenzionalne izdelke predstaviti s pomočjo 3D računalniške grafike, torej tudi za področje vizualizacij oblačil in tekstilnih izdelkov, ki se uporabljajo pri modnem oblikovanju in oblikovanju interjerjev, avtomobilski, navtični in letalski industriji ter tudi širše, kjer so dovršene 3D vizualizacije tekstilij in oblačil nepogrešljivi element vizualnih in grafičnih komunikacij.

Ključne besede: 3D računalniška grafika, CIECAM02, Blender, upodabljanje barve

Abstract

Despite technological progress in the last centuries and decades the problem of the representation and rendering of colours is still present. One of the options to achieve constant colour appearance are colour appearance models. Currently the colour appearance model CIECAM02 is still not employed in 3D computer generated graphics, which have become an everyday occurrence. The aim of this research was an overview of colour spaces used in 3D computer generated graphics, a review of colour reproduction and materials, shading algorithms and selected modern technologies for achieving solid visualization. In addition, we also wanted to investigate the colour appearance model CIECAM02 to such extent that it could be applied to 3D computer generated graphics. For this purpose, a test scene was setup and rendered with three rendering engines (the built-in Blender Render and Cycles and the add-on Yafaray) in Blender. It was confirmed that CIECAM02 can be used in 3D space and its use grants better colour matching when changing the background. Furthermore, it was ascertained that colour was differently rendered using different rendering engines. This research is convenient for all those who would like to present their two- or three-dimensional products with 3D computer generated graphics. Hence, for the fields of clothing and textile goods visualization used in fashion and interior design, the automotive, nautical and aircraft industry and beyond, where impeccable 3D visualizations of textile and clothing represent an indispensable element of visual and graphic communications.

Keywords: 3D computer generated graphics, CIECAM02, Blender, colour rendering

Korespondenčna avtorica/Corresponding author:
Nika Bratuž, mag. graf. inž.
 E-pošta: nbratuž@gmail.com

Tekstilec, 2017, **60**(2), 97-106
 DOI: 10.14502/Tekstilec2017.60.97-106

1 3D računalniška grafika

Raziskovalno in razvojno področje, ki doživlja velik preboj v zadnjih desetletjih, so 3D tehnologije. Te postajajo čedalje bolj popularne, zahteve uporabnikov se povečujejo, srečujemo pa tudi zahteve po natančni in nadzorovani upodobitvi barve in realističnem izrisu. Sem spadajo področja arhitekture, antropologije in arheologije, umetnosti, industrijskega oblikovanja, modnega oblikovanja, oblikovanja interjerjev, avtomobilska, navtična in letalska industrija in celo medicina [1–7], kjer je vizualizacija oblačil in tekstilnih izdelkov uporabljena kot podpora grafičnim komunikacijam.

Proces izrisa 3D računalniško generiranega prostora je kompleksen in odvisen od številnih dejavnikov in njihovega medsebojnega delovanja, končni rezultat pa je brez natančnega poznavanja posameznih algoritmov in funkcij, ki vplivajo tudi na upodobitev barve, težko predvidljiv [8]. Malokatero programsko orodje za izdelavo 3D računalniške grafike ponuja možnost barvnega upravljanja [9], proces izrisa pa mora kljub kompleksnosti biti še vedno časovno in prostorsko varčen. Na upodobitev barve in izris vplivajo topologija modela, lastnosti materiala, senčenje, teksture, osvetljevanje in upodabljanje [1, 10, 11]. Glede vpliva samih materialov in osvetlitve na upodobljeno barvo je bilo opravljenih malo raziskav, vsem pa je skupno, da ljudje barvo na upodobljenih modelih zaznavamo drugače, kot jo predvidevajo algoritmi in metode za upodabljanje [10, 12]. Razlike pa nastajajo tudi med samimi upodobljevalniki [13, 14]. Čeprav so splošni algoritmi upodabljanja znani [15, 16], točni algoritmi, pa tudi sama programska oprema, niso vedno prosto dostopni, prav tako pa ni na voljo standardizirane metode testiranja upodobljevalnikov [17].

Začetki računalniške grafike in animacije segajo v petdeseta leta dvajsetega stoletja [18, 19]. Raziskave na področju računalniške grafike so spodbudile njeno širjenje na področja industrije in umetnosti, še zlasti pa se je uveljavila v znanstvenih in tehnoloških simulacijah ter v filmski industriji [20, 21]. Kakovost 3D vizualizacij je danes tako rekoč primerljiva z resničnostjo [22–24].

V računalniški grafiki barvo po navadi opredelimo s prisotnostjo posameznih barvnih komponent v sliki (npr. RGB in CMYK) ali s kombinacijo zaznavnih lastnosti barve. Barvni model je matematičen model, kjer so barve predstavljene z nizom števil, ki pomenijo določene barvne komponente. Ko je barvni

model povezan z določeno funkcijo preslikave (na primer pogoji opazovanja), dobimo barvni prostor. Barvne prostore delimo na neodvisne barvne prostore (npr. CIELAB) in prostore, ki so odvisni od naprave (npr. RGB) [25]. V programskih orodjih za izdelavo in obdelavo računalniške grafike se uporabljajo intuitivni barvni modeli, s pomočjo katerih lahko uporabnik operira brez naprednega poznavanja barvne metrike in reprodukcije barve.

Ti modeli so RGB, HSV, HSL, HSI, YUV, YIQ, YCbCr in Rec. 709 barvni prostori. RGB je eden najpogostejše uporabljenih barvnih modelov, saj je iz osnovnega modela izpeljanih več RGB barvnih prostorov, npr. sRGB in Adobe RGB ter Wide Gamut RGB in ProPhoto RGB. sRGB je najmanjši, sledita mu Adobe RGB in Wide Gamut RGB, ProPhoto pa posega v področje imaginarnih barv, ki niso vidne. RGB je eden bolj razširjenih barvnih modelov, saj je uporabljen kot vhodni ali izhodni barvni prostor večine naprav [25]. Pri RGB barvnih modelih je treba omeniti tudi korekcijo gama, ki je nelinearna operacija, uporabljena za prilagajanje svetlosti in RGB vrednosti v računalniški grafiki in videu. Vključena je pri izračunu RGB vrednosti za sRGB barvni prostor iz CIEXYZ standardiziranih barvnih vrednosti [26].

HSL in HSV sta barvna prostora, izpeljana iz RGB barvnega modela. Razvita sta bila v 70. letih 20. stoletja za uporabo v računalniški grafiki, zdaj pa se uporabljata v aplikacijah za urejanje in manipulacijo slik pri slikovni analizi in računalniškem vidu [25, 27].

Z opisom barvnega tona in nasičenostjo dobimo informacijo o sami barvi, temu pa je treba dodati še svetlostno oziroma intenzitetno komponento (I), ki jo upošteva prostor HSI in je ravno zato idealen barvni prostor za izvajanje obdelave barvnih slik [27].

YUV in YIQ sta barvna prostora, ki se uporabljata pri zajemu, shranjevanju, prenosu in prikazu TV-signalov in sta sestavni del analognih televizijskih sistemov NTSC in PAL. Z omenjenima prostoroma se v računalniški grafiki srečamo pri pripravi animiranih vsebin [25, 27]. Velikost barvnih prostorov je omejena z medijem prikaza generirane slike.

2 Model barvnega zaznavanja CIECAM02

Dojemanje in natančen prikaz barv sta večni vprašanja, s katerima se ukvarjamo od nastanka prvih slik. Kljub napredku zadnjih desetletij se je z večanjem

števila novih tehnologij ta problematika še povečala, univerzalnega odgovora pa še vedno nimamo [28–30]. Številne raziskave so pokazale, da na zaznavo barve ne vplivajo samo opazovalec, svetlobni vir in dražljaj, ampak tudi številni drugi pojavi [31, 32]. Na podlagi teh ugotovitev se je začela širiti barvna metrika in številni raziskovalci so poskušali opisati različne pojave, povezane z zaznavo barve, tudi z modeli barvnega zaznavanja. CIECAM02 je sicer zaradi preproste strukture primeren za praktično uporabo na različnih področjih in se lahko uporablja za barvne preslikave, kot vezni prostor v barvnem upravljanju [33, 34], za izračun barvnih razlik [35], napovedi upodobitve barve pod različnimi svetlobnimi viri, pri določanju barvnih razlik in pri določanju metamerije [36, 37].

Kljub aktualnosti 3D tehnologij pa raziskav, pri katerih bi se CIECAM02 uporabil v 3D upodabljanju, ni veliko.

3 Delokrog vizualizacij in računalniško generirane grafike

Nastanek 3D računalniško generirane grafike opišemo z več koraki: *3D modeliranje*, določanje *tekstur* in *materialov*, *svetlobnih virov* in *kamere*. Na koncu *upodobljevalniki* informacije predhodnih faz preberejo in jih s pomočjo matematičnih algoritmov prevedejo v 2D izris.

3.1 Modeliranje

Modeliranje temelji na geometričnem opisu osnovnih geometrijskih objektov v 3D prostoru. Ti objekti se uporabljajo kot gradniki modela, ki jim je treba določiti položaj v prostoru in morebitne odnose z



Slika 1: Tekstilna objekta, sestavljena iz manjšega in večjega števila poligonov

Figure 1: Textile objects, composed of a smaller and larger number of polygons

drugimi objekti v prostoru. Z matematičnega vidika pod osnovne gradnike spadajo točka, premica, daljica, vektor in ravnina, v 3D računalniški grafiki pa se kot gradniki osnovnih modelirnih tehnik uporabljajo poligoni, krivulje NURBS (angl. *Non-uniform rational basis spline*), subdivizija in tudi kompleksnejši elementi, kot so na primer proceduralni objekti. Na sliki 1 je prikazano drapiranje tekstilnega objekta z manjšim in večjim številom poligonov [11].

3.2 Optične lastnosti materialov in osvetljevanje

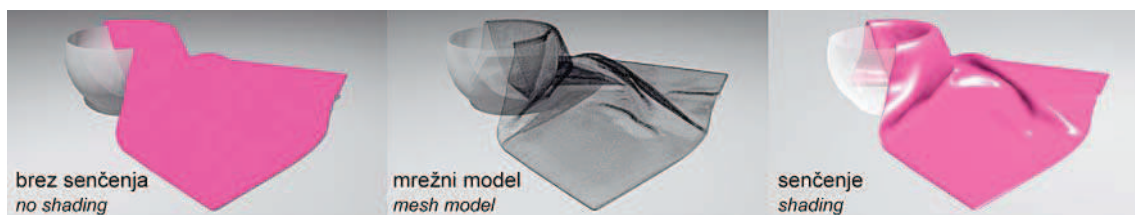
V osnovi so objekti na 3D sceni žični modeli, ki ne dajo jasne predstave o objektu pri prenosu v 2D prostor oziroma pogledu skozi kamero, zato je treba vsakemu poligonu in oglišču določiti način interakcije s svetlobo na sceni. Z določanjem materiala dodelimo objektu optične lastnosti: odboj ali refleksija (zrcalni ali difuzni), lom, transmisija, absorpcija in sipanje (slika 2). Svetloba, ki jo obravnavamo v računalniški grafiki, je simulacija dvojne narave svetlobe, kot delec in kot elektromagnetno valovanje, zato je osvetljevanje v 3D prostoru kompleksen proces. Svetloba namreč ne potuje samo od svetlobnega vira proti objektom (*direktno osvetljevanje*, ki ga ustvarjajo različni tipi luči: *ambientalna*, *usmerjena*, *točkast vir svetlobe*, *reflektor*), temveč se odbija tudi od drugih objektov na sceni, ki so tako sekundarni vir svetlobe. Takšne izračune omogočajo *globalno osvetljevanje* in napredni algoritmi upodabljanja (sledenje žarkom, mapiranje fotonov, sledenje poti) [11].



Slika 2: Predmeti z različnimi optičnimi lastnosti
Figure 2: Objects with a range of optical attributes

3.3 Teksture, materiali in barva v 3D računalniški grafiki

Teksture so informacije o barvi in nepravilnostih v materialu in jih lahko nanašamo tudi s pomočjo mapiranja, s senčenjem pa simuliramo interakcijo



Slika 3: Plosko senčenje, mrežni model in izris z naprednim senčenjem

Figure 3: From left to right, flat shading, wire mesh and shaded model

svetlobe s površino materiala ter posamezni slikovni točki pripišemo končni barvni in optični učinek. Nekoč so se za izris uporabljali preprosti algoritmi, katerih rezultat je bila ploskovna slika, zato se za večjo realističnost uporabljajo algoritmi za senčenje (slika 3).

Senčenje delimo na interpolacijske tehnike (plosko, Gouraud in Phong) in na modele, ki temeljijo na osvetlitvi [38]. Pri *Gouraudovem senčenju* se za izračun barve uporablja povprečje normal poligonov, ki se dotikajo posameznega oglišča, tako da izračuna (interpolira) barve med posameznimi oglišči in med njimi ustvari gradient [11]. *Senčenje Phong* namesto barv interpolira normale površine poligonov za vsako slikovno točko. V primerjavi z Gouraudovim senčenjem dobimo boljše rezultate, saj interpolira barve za vsako slikovno točko in lepše izriše zrcalni odboj, a je zato tudi časovno zahtevnejša metoda [16, 39, 40]. Interpolacijske tehnike se lahko uporabljajo v kombinaciji z metodami senčenja, ki temeljijo na osvetlitvi. Te so opisane v nadaljevanju. *Lambertovo senčenje* je preprosta metoda, pri kateri se barva ploskve poligona spreminja glede na kot vpadne svetlobe in oddaljenost svetlobnega vira. *Senčenje Blinn* je nadgradnja *senčenja Phong* [40, 41]. *Senčenje Cook-Torrance* vsako ploskev razdeli na mikrorobne ploskve oziroma mikrofasete, ki odbijajo vhodno svetlobo glede na razliko njihovih kotov [42]. *Senčenje Oren-Nayar* je primerno za objekte s hrapavo površino, ki svetlobo odbijajo difuzno. Tako kot model Cook-Torrance deluje po principu mikrorobnih ploskev (ang. *microfacet*) in po principu Lambertovega senčenja ustvari sence [15, 43]. *Senčenje Fresnel* temelji na Fresnelovem odboju, a ker je le-ta kompleksen, ga po navadi opišemo s Schlickovim približkom. Uporaben je za kovinske in steklene materiale [44]. *Senčenje Minnaert* je nadgradnja Lambertovega senčenja, ki temelji na Minnaertovi funkciji, ki se uporablja predvsem za svetleče materiale in pri astronomskem opazovanju. Uporabno je za porozne in nesijajne materiale

(kreda, brušena kovina, lunina površina) in ga imenujemo tudi lunino senčenje [45]. *Toon* omogoča nerealistično senčenje, vizualizacije so podobne ročno risani animaciji.

3.4 Računalniške simulacije in vizualizacija tekstilij in oblačil

Računalniško gnane dinamične simulacije mehkih prožnih teles so osnova animacijam oblačil in tekstilij. To je mogoče simulirati z računsko precej potratnimi metodami, in sicer z metodo vzmetne mase, z energijskimi funkcijami in metodami končnih elementov. Poleg dinamičnih simulacij se za modeliranje tekstilij uporabljajo tudi volumetrični modeli, analiza silhuet slik, metoda, imenovana dvosmerna teksturna funkcija, in ne nazadnje 3D skeniranje. Za vizualizacijo tekstilij se uporabljajo teksture, ki določajo barvni videz, in mape, ki po plasteh definirajo optične lastnosti tekstilije. Najpogosteje uporabljene mape so: difuzna RGB barvna mapa, ki pomeni osnovno barvo teksture; reliefna sivinska ali barvna mapa, ki simulira relief tkanine; sivinska alfa mapa, ki vpliva na videz prosojnosti teksture, ter zrcalna mapa za določanje mest tekstilije (preje) z zrcalnim odbojem. Naprednejše metode vizualizacije tekstilij in oblačil vključujejo matematične modele videza oblačil (ang. *cloth appearance model*), ki jih na splošno delimo na površinske modele, volumetrične in eksplisitne modele [46].

3.5 Izris

Upodabljanje omogoči končni izris s pomočjo algoritmov upodabljanja, globalnega osvetljevanja, globinskega kanala in upoštevanja Fenomenov. 3D scena se tako preračuna v 2D sliko oziroma zaporedje slik. Čas izrisa je odvisen od zahtevnosti scene (vrsta modela, senčenja, luči, kamere, posebni učinki), končen rezultat pa so lahko povsem ploskovne slike ali pa fotorealistične upodobitve [11, 15]. Kot primer, izris identične scene na sliki 4 je s 50 prehodi žarka



Slika 4: Izris slike tekstila s 50 in 100 prehodi ter s 1000 prehodi

Figure 4: Image rendered with 50, 100 and 1000 passes

trajal 13 sekund, s 100 prehodi na minuto, medtem ko je izris s 1000 prehodi trajal osem minut (izris s centralno procesno enoto Intel® Core™ i5-3320M). Upodobljevalniki delujejo po eni tehniki ali po kombinaciji več tehnik in metod, ki so opisane v nadaljevanju.

Sledenje žarku, kjer algoritem za vsako slikovno točko sledi poti svetlobe na sceni. Ko žarek iz kamere zadane površino, se glede na vrsto materiala računajo tri vrste interakcij: refleksija, lom ali senca (ko se žarek ne odbije proti svetlobnemu viru). Ta metoda izrisa je počasna ter daje dokaj realistične rezultate in dobro oriše določene optične pojave [15, 17].

Metoda *sledenje poti* sledi poti svetlobe od kamere proti svetlobnemu viru. Kakovost izrisa s sledenjem poti je odvisna od števila vzorčenj, ki jih opravi algoritem, tako da je fotorealističen izris po navadi odvisen od daljšega časa izrisa.

Mapiranje fotonov je nadgradnja metode sledenja žarkov, ki temelji na generiranju mape fotonov, kjer fotoni potujejo iz svetlobnega vira po sceni in se odbijajo po sceni. Čim večkrat se foton dotakne določene točke na sceni, tem svetlejša bo ta točka. Tako nastane mapa fotonov, na podlagi katere se s pomočjo sledenja žarku izriše slika. Ta metoda daje zelo realistične rezultate [17].

Pri metodi *dvosmernega sledenja poti* žarek potuje sočasno iz smeri kamere in iz smeri svetlobnega vira, tako da se preračunajo vse mogoče kombinacije

povezav. Za to metodo je značilna fizikalna natančnost, vendar je časovno zahtevna [15, 17].

Fizikalno natančno upodabljanje upošteva vse tipe interakcij svetlobe z materialom. Matematičnih poenostavitvev pri računanju optičnih pojavov je tukaj zelo malo (statistične poenostavitve). Ta metoda daje popoln fotorealizem, vendar še ni časovno optimizirana [47].

4 Program za 3D računalniško grafiko Blender

V odprtokodnem programu za računalniško grafiko Blender sta vgrajena dva upodobljevalnika – Blender Render in Cycles. Uporabimo lahko tudi druge upodobljevalnike v obliki dodatkov, vtičnikov (kot na primer Yafaray) ali samostojne upodobljevalnike [8]. Lastnosti materialov določamo glede na izbrani upodobljevalnik. V upodobljevalniku Blender Render in Cycles jih nadziramo s pomočjo treh lastnosti: difuznega odboja, zrcalnega odboja in popolnega zrcalnega odboja. Tako so za difuzno lastnost materiala v Blenderju (Blender Render) predvidena naslednja senčenja (slika 5) [8, 10]: *Lambert*, *Oren-Nayar*, *Toon*, *Minnaert* in *Fresnel*, ki so opisana v poglavju 3.3.

4.1 Barvno upravljanje v programu Blender

Blender se kot eno redkih programskih orodij za 3D računalniško grafiko lahko pohvali s podporo barvnemu



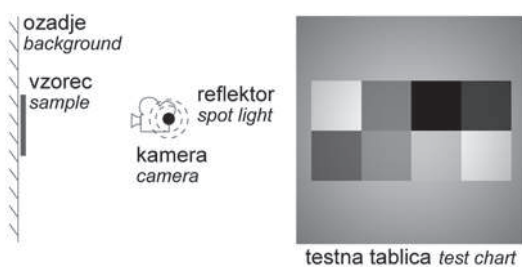
Slika 5: Primeri difuznih senčenj v Blenderju

Figure 5: Samples of diffuse shading in Blender

upravljanju. V Blender je integriran OpenColorIO, odprtodni sistem barvnega upravljanja. Kljub prizadevnosti razvijalcev Blender še ne podpira ICC barvnih profilov, ponuja pa linearen sistem barvnega upravljanja. Sami algoritmi lahko operirajo na barvah, kjer prilagoditev gama ni upoštevana, večina delovnih RGB barvnih prostorov in drugih orodij, ki se uporabljajo v 3D računalniški grafiki, pa gamo upošteva. Program Blender z linearizacijo game pretvori barvni prostor v linearnega za potrebe izrisa in ga nato ponovno pretvori v želeni barvni prostor. Pod nastavitvami barvnega upravljanja ponuja izbiro naprave in barvnega prostora za prikaz, način prikaza na napravi, s katerim lahko simuliramo različne medije, čas osvetlitve in želeno gamo, prilagajamo pa lahko tudi tonske krivulje posameznih kanalov. Čeprav Blender to orodje imenuje barvno upravljanje, to ni v smislu, kot ga poznamo iz prakse profesionalnega barvnega upravljanja [48, 49]. V barvnem upravljanju Windows se CIECAM02 uporablja za pretvorbo med barvnimi prostori, odvisnimi in neodvisnimi od naprav, zato smo po pregledni raziskavi proučili možnost za njegovo uporabo na področju 3D računalniške grafike. Ob tem smo predvidevali, da bo CIECAM02 uporaben tudi v 3D prostoru.

4.2 Definiranje testnih postavitev in ugotovitve

Za določitev razlike med upodobljevalniki smo v programskem orodju Blender zasnovali sceno, sestavljeno iz ozadja, objekta, svetlobnega vira in kamere (slika 6). Uporabljeni so bili trije različni upodobljevalniki: Blender Render, Cycles in Yafaray.



Slika 6: Shematičen prikaz postavitve scene v programu Blender (levo) in sivinska testna tablica (vzorec, desno)

Figure 6: Schematic presentation of scene setup in Blender (left) and grey test chart (sample, right)

Ozadje in vzorec sta bila definirana kot difuzni material z Lambertovim senčenjem, brez reflektivnosti

z intenziteto 1. Kamera je bila postavljena pred vzorec na oddaljenost 10 enot. Za kamero je bil postavljen svetlobni vir (reflektor) s svetlobo bele barve in snopom v velikosti 120° , pojemek svetlobe je bil nastavljen na konstanten. Intenziteta svetlobnega vira se je spreminjala glede na upodobljevalnik (Blender Render je 1, za Cycles 4000, Yafaray 14). Velikost slike v upodobljevalniku je bila nastavljena na 800×800 v barvnem prostoru sRGB. Barve so bile podane v obliki datoteke .csv od $[0, 0, 0]$ do $[255, 255, 255]$ po koraku 25,5 za vsak kanal posebej (skupaj 1331 vzorcev). V Blender so bile vnesene kot vhodne vrednosti RGB, ciljne vrednosti RGB brez prilagoditve, ki so bile enake vhodnim, in kot prilagojene ciljne vrednosti RGB, ki so bile izračunane s pomočjo CIECAM02. Svetlost ozadja se je spremenila z $Y_B=20\%$ na $Y_B=80\%$ svetlosti. Svetlost v okolju prilagoditve je bila nastavljena na $L_A=16 \text{ cd/m}^2$, bela točka na D65, tip okolice pa je bil definiran kot povprečen [2].

Med pari vzorcev je bila izračunana barvna razlika CIEDE2000. Rezultati so prikazani v preglednici 1 kot povprečna barvna razlika med vhodnim vzorcem na temnejšem ozadju in ciljnim neprilagojenim vzorcem na svetlejšem ozadju ter vhodnim vzorcem na temnejšem in ciljnim prilagojenim vzorcem na svetlejšem ozadju. Po pričakovanjih je bila razlika med vhodnim in neprilagojenim ciljnim vzorcem enaka nič, kar pomeni, da pri ploskovnem vzorcu upodobljevalnik ne vpliva na upodobljeno barvo, saj zaradi geometrije scene na vzorcu ni vidnih senc. Povprečne barvne razlike med vhodnim in prilagojenim ciljnim vzorcem so večje, saj se s prilagoditvijo s CIECAM02 spremenijo vrednosti RGB. Blender Render in Yafaray sta dala podobne rezultate, medtem ko je barvna razlika pri uporabi Cyclesa večja.

Preglednica 1: Izračunane CIEDE2000 med vhodnim in neprilagojenim ciljnim vzorcem ter med vhodnim in prilagojenim ciljnim vzorcem za vse tri upodobljevalnike

Upodobljevalnik	20 % -> 80 % brez CIECAM	20 % -> 80 % CIECAM
Blender Render	0	4,89
Cycles	0	4,99
Yafaray	0	4,87

Table 1: Calculated CIEDE2000 colour difference between input and rendered, and input and adapted rendered colours with three rendering engines

Rendering engine	20% -> 80% no CIECAM	20% -> 80% CIECAM
Blender Render	0	4.89
Cycles	0	4.99
Yafaray	0	4.87

Table 2: Calculated CIEDE2000 colour difference between rendered and adapted rendered colours for pairs of rendering engines

Rendering engine pairs	80% no CIECAM	80% CIECAM
BR-CY	3.01	3.09
BR-YF	0.30	0.32
CY-YF	3.28	3.37

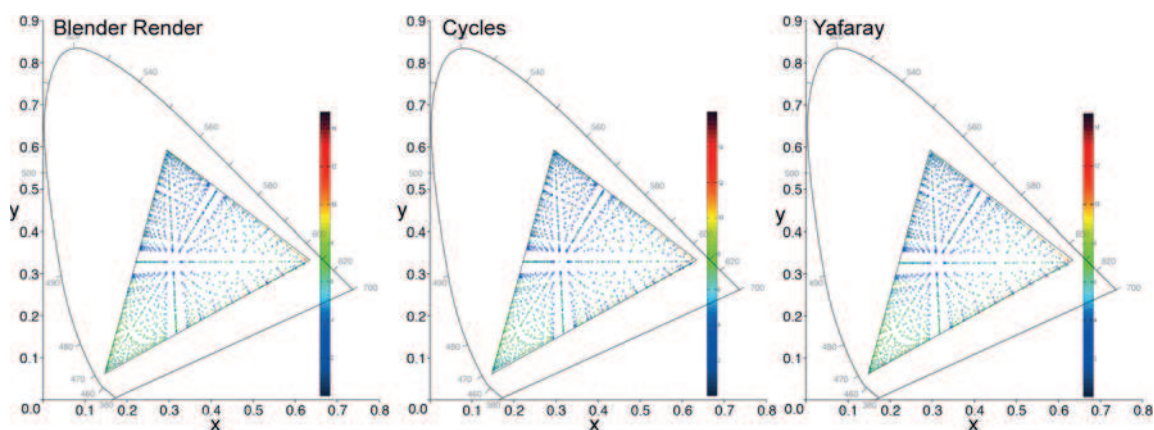
Iz preglednice 2 je razvidno, da Blender Render (BR) in Yafaray (YF) podobno vplivata na barvo, saj je bila barvna razlika med vhodnimi vzorci in neprilagojenimi vzorci manjša kot pri primerjavi vhodnih in neprilagojenih vzorcev med Blender Renderjem in Cyclesom (CY) ter Yafarayem in Cyclesom.

Preglednica 2: Izračunane povprečne CIEDE2000 med neprilagojenimi ciljnim vzorci in med neprilagojenimi ciljnim vzorci za pare upodobljevalnikov

Pari upodobljevalnikov	80 % brez CIECAM	80 % CIECAM
BR-CY	3,01	3,09
BR-YF	0,30	0,32
CY-YF	3,28	3,37

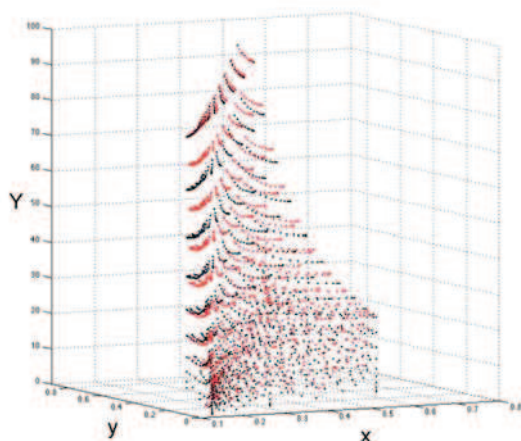
Na sliki 7 je vidno, da je izračunana napaka CIEDE2000 večja v spodnjem levem delu barvnega prostora sRGB v kromatičnem diagramu. Tu se nahajajo modri toni, za katere je znano, da se slabše reproducirajo pri uporabi CIECAM02 [28]. Barvne razlike so velike tudi pri nasičenih barvah z nizko svetlostjo.

Rezultati so pokazali, da se prilagojene barve premaknejo proti notranjosti diagrama, tako da se jim manjša nasičenost in povečuje svetlost, kar je razvidno iz slike 8, kjer so vhodne in prilagojene ciljne barve prikazane v diagramu xyY. To se ujema z nastankom sočasnega kontrasta, za katerega velja, da so barve na temnejšem ozadju videti svetlejšje in na svetlem temnejše. Ker CIECAM02 upošteva nastanek sočasnega kontrasta, barve na svetlem ciljnim ozadju prilagodi tako, da jim poveča svetlost.



Slika 7: Prikaz CIEDE2000 v CIE1931 x, y barvnem diagramu med vhodno in upodobljeno prilagojeno barvo z Blender Renderjem (levo), Cyclesom (na sredini) in Yafarayem (desno)

Figure 7: Presentation of CIEDE2000 colour differences between input and rendered adapted colour for Blender Render (left), Cycles (middle) and Yafaray (right)



Slika 8: Na diagramu xyY so prikazane vhodne barve (črna) in ciljne prilagojene barve (rdeča)

Figure 8: Presentation of input colours (black) and adapted colours (red) in xyY diagram

Iz rezultatov lahko povzamemo, da upodobljevalniški barve ne prilagodijo ozadju in da lahko z uporabo CIECAM02 izboljšamo barvni vtis pri spremembi barve ozadja. Največje barvne razlike so nastale pri modri barvi, kar je bilo pričakovati pri upodobljevalniku Cycles.

5 Sklepi

Kljub napredku računalniške grafike proces izrisa 3D prostora ni preprost, saj je odvisen od velikega števila dejavnikov in od njihove soodvisnosti. Eden teh dejavnikov je gotovo tudi upodobitev barve, in to ne samo na področju 3D tehnologij, temveč tudi na drugih področjih računalniške grafike. Problematika reprodukcije barve se je z nastankom novih medijev in širjenjem njihove uporabe še povečala in kljub ustaljenim metodam še vedno nimamo univerzalne rešitve za zagotavljanje konstantnega barvnega vtisa. V naši raziskavi smo po temeljiti predstavitvi upodobitve barve v 3D računalniški grafiki uporabili model barvnega zaznavanja CIECAM02 pri izrisu 3D barvne slike v programu Blender, čeprav samo v osnovni neintegrirani obliki. Opisali in uporabili smo tri upodobljevalnike (Blender Render, Cycles in Yafaray). Izkazalo se je, da se CIECAM02 lahko aplicira tudi na 3D računalniško grafiko in da v večini primerov dobimo boljši rezultat pri spremembi ozadja z uporabo

omenjenega modela. Pri tem smo ugotovili, da upodobljevalnik Blender Render z barvo ravna drugače in bolj linearno, vsaj kar se svetlosti in krome tiče, kot Cycles in Yafaray. Tadva namreč ne obravnava vseh barv enako, temveč se senčenje spreminja z barvo. V raziskavi smo potrdili, da različni upodobljevalniki različno vplivajo na končni izris 3D računalniško generiranega prostora in na upodobitev barv, razlika je bila še zlasti opazna pri upodobljevalniku Cycles. Menimo, da ima znanje s tega področja potencial v prihodnosti, saj barva ostaja eden poglobitvinih elementov komunikacije na področju arhitekture, modnega oblikovanja, antropologije in arheologije, umetnosti, industrijskega oblikovanja, oblikovanja interjerjev, ter v avtomobilski, navtični in letalski industriji.

Viri

1. VAN NOORT, Richard. The future of dental devices is digital. *Dental Materials*, 2012, **28**(1), 3–12, doi:10.1016/j.dental.2011.10.014.
2. GUO, Jianya, MEI, Xi, TANG, Kun. Automatic landmark annotation and dense correspondence registration for 3D human facial images. *BMC Bioinformatics*, 2013, **14**(1), 1–12, doi: 10.1186/1471-2105-14-232.
3. MELCHELS, Ferry P. W., KLEIN, Travis J., MALDA, Jos, HUTMACHER, Dietmar W., DOMINGOS, Marcos A. N., BARTOLO, Paulo J. Additive manufacturing of tissues and organs. *Progress in Polymer Science*, 2012, **37**(8), 1079–1104, doi:10.1016/j.progpolymsci.2011.11.007.
4. MARTÍN LERONES, Pedro, LLAMAS, José, GÓMEZ-GARCÍA-BERMEJO, Jaime, ZALAMA, Eduardo, CASTILLO OLI, Jesus. Using 3D digital models for the virtual restoration of polychrome in interesting cultural sites. *Journal of Cultural Heritage*, 2014, **15**(2), 196–198, doi: 10.1016/j.culher.2013.03.009.
5. GOESELE, Michael, LENSCH, Henirk P. A., SEIDEL, Hans-Peter. *Validation of color managed 3D appearance acquisition* [dostopno na daljavo]. Saarbrücken : MPI Informatik, 2004 [citirano 28. 3. 2017]. Dostopno na svetovnem spletu: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download;jsessionid=3F33AC155299C45906A1C57D0F90816C?doi=10.1.1.89.7386&rep=rep1&type=pdf>>.

6. PAVIOTTI, Anna, BRUSCO, Nicola, CORTELAZZO, Guido Maria. Full automation and true colors in 3D modeling of cultural heritage. *SPIE Newsroom* [dostopno na daljavo]. Obnovljeno 17. 5. 2007 [citirano 28. 3. 2017]. Dostopno na svetovnem spletu: <<http://spie.org/newsroom/0718-full-automation-and-true-colors-in-3d-modeling-of-cultural-heritage?pf=true>>.
7. KOCH, Jörg, HENRICH, Niklas, MUELLER, Stefan. Spatial color confidence for physically based rendering settings on LC displays. V *GRAPP 2010 – Proceedings of the International Conference on Computer Graphics Theory and Applications*. Angers : Springer-Verlag, 2010, 173–180.
8. *User manual* [dostopno na daljavo]. Blender.org, 2016 [citirano 29. 3. 2017]. Dostopno na svetovnem spletu: <<https://docs.blender.org/manual/en/dev/>>.
9. PHARR, Matt, HUMPHREYS, Greg. *Physically based rendering. Second Ed.: from theory to implementation*. Burlington, Massachusetts : Morgan Kaufmann, 2010, 4–15.
10. MULLEN, Tony. *Mastering Blender*. Indianapolis : Wiley Publishing, 2009, 474.
11. CHOPINE, Ami. *3D art essentials : the fundamentals of 3d modeling, texturing, and animation*. Burlington : Focal Press, 2011, 228.
12. DOERSCHNER, Katja, BOYACI, Huseyin, MALONEY, Laurence T. Human observers compensate for secondary illumination originating in nearby chromatic surfaces. *Journal of Vision* 2004, 4(2), 92–105, doi:10.1167/4.2.3.
13. MOTOYOSHI, Isamu, NISHIDA, Shin'ya, SHARAN, Lavanya, ADELSON, Edward H. Image statistics and the perception of surface qualities. *Nature*, 2007, 447(7141), 206–209, doi:10.1038/nature05724.
14. MCNAMARA, Ann. *Visual perception in realistic images* [dostopno na daljavo] [citirano 28. 3. 2017]. Dostopno na svetovnem spletu: <<http://luthuli.cs.uiuc.edu/~daf/courses/Rendering/Papers3/VPinRIS.pdf>>.
15. PHARR, Matt, HUMPHREYS, Greg. *Physically Based rendering : from theory to implementation*. Second Edition. Burlington : Elsevier, 2010, 1167.
16. PHONG, Bui Tuong. Illumination for computer generated pictures. *Communications of the ACM*, 1975, 18(6), 311–317, doi:10.1145/360825.360839.
17. VIDMAR, Žan. *Primerjava različnih upodobljivvalnikov v programu Autodesk Maya : diplomsko delo*. Ljubljana, 2013, 49.
18. ZHANG, Michael. *First digital photograph ever made* [dostopno na daljavo]. PetaPixel, 4. 11. 2010 [citirano: 28. 3. 2017]. Dostopno na svetovnem spletu: <<http://petapixel.com/2010/11/04/first-digital-photograph-ever-made>>.
19. Luxo, Jr. (character). V *Pixar Wiki* [dostopno na daljavo] [citirano 28. 3. 2017]. Dostopno na svetovnem spletu: <[http://pixar.wikia.com/Luxo,_Jr._\(character\)](http://pixar.wikia.com/Luxo,_Jr._(character))>.
20. CARLSON, Wayne. *A critical history of computer graphics and animation. Section 20 : icons of computer graphics* [dostopno na daljavo]. Ohio State University, 2014 [citirano 28. 3. 2017]. Dostopno na svetovnem spletu: <<https://design.osu.edu/carlson/history/lesson20.html>>.
21. ROBERTSON, B. Light hearted. *3D World*, 2013, 14(172), 34–41.
22. *This wedding photo is a 'Jurassic Park' fan's dream come true* [dostopno na daljavo]. Huffington Post, 16. 12. 2013 [citirano 29. 3. 2014]. Dostopno na svetovnem spletu: <<http://www.outbackprint.outbackphoto.com/printinginsights/pi048/essay.html>>.
23. ROARTY, D. Happy birthday Nana. *3D World*, 2013, 14(172), 27.
24. FERNANDES, A. Hague apartment. *3D World*, 2014, 15(180), 15.
25. BURGER, Wilhelm, BURGE, Mark J. *Principles of Image processing : fundamental techniques*. London : Spinger-Verlag, 2009, 273.
26. LINDBLOOM, Bruce. *Useful color equatins* [dostopno na daljavo] [citirano: 28. 3. 2017]. Dostopno na svetovnem spletu: <<http://www.brucelindbloom.com>>.
27. GONZALEZ, Rafael C., WOODS, Richard E., EDDINS, Steven L. *Digital image processing using MATLAB*. Gatesmark, 2009, 844.
28. LUO, Ming Ronnier, LI, Changjun. Chapter 2 : CIECAM02 and its recent developements. V *Advanced Color Image Processing and Analysis*. Uredil C. Fernandez-Maloigne. New York : Springer Science+Business Media, 2013, 19–58.
29. *CIE technical report : colorimetry*. Third edition. Vienna : Commission Internationale de l'Eclairage, 2004, 72.
30. FAIRMAN, Hugh S., BRILL, Michael H., HEMMENDINGER, Henry. How the CIE 1931

- color-matching functions were derived from Wright-Guild data. *Color research and application*, 1997, **22**(1), 11–23, doi: 10.1002/(SICI)1520-6378(199702)22:1<11::AID-COLA>3.0.CO;2-7.
31. HURLBERT, Anya. Color vision : putting in context. *Current Biology*, 1996, **6**(11), 1381–1384, doi:10.1016/S0960-9822(96)00736-1.
 32. WINAWER, Jonathan, WITTHOFT, Nathan, FRANK, Michael C., WU, Lisa, WADE, Alex R., BORODITSKY, Lera. Russian blues reveal effects of language on color discrimination. *Proceeding of National Academy of Science of United States of America*, 2007, **104**(19), 7780–7785, doi: 10.1073/pnas.0701644104.
 33. *Specification ICC.1:2010 : image technology colour management – architecture, profile format, and data structure*. Reston : International Color Consortium, 2010, 113.
 34. *Windows color system* [dostopno na daljavo]. Microsoft Developer Network, 2014, obnovljeno 16. 11. 2010 [citirano 28. 3. 2017]. Dostopno na svetovnem spletu: <[http://msdn.microsoft.com/en-us/library/windows/desktop/dd372446\(v=vs.85\).aspx](http://msdn.microsoft.com/en-us/library/windows/desktop/dd372446(v=vs.85).aspx)>.
 35. MELGOSA, Manuel, TRÉMEAU, Alain, CUI, Guihua. Chapter 3 : Color difference evaluation. V *Advanced Color Image Processing and Analysis*. Uredil C. Fernandez-Maloigne. New York : Springer Science+Business Media, 2013, 59–78.
 36. FAIRCHILD, Mark. *Color appearance models*. Chichester : John Wiley & Sons, 2005, 385.
 37. GUAY, Randy, SHAW, Mark. Dealing with imaginary color encodings in CIECAM02 in an ICC workflow. V *Thirteenth Color Imaging Conference: Color Science and Engineering Systems, Technologies, and Applications*. Scottsdale, Arizona : Society for Imaging Science and Technology, 2005, 318.
 38. List of common shading algorithms. V *Wikipedia : The Free Encyclopedia* [dostopno na daljavo]. Obnovljeno 27. 7. 2016 [citirano 28. 3. 2017]. Dostopno na svetovnem spletu: <http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_common_shading_algorithms>.
 39. OREN, Michael, NAYAR, Shree K. Generalization of Lambert's reflectance model. V *SIGGRAPH '94 Proceedings of the 21st annual conference on Computer graphics and interactive techniques*. Orlando, Florida : ACM New York, NY, USA, 1994, 239–246.
 40. PHONG, Bui Tuong. Illumination for Computer Generated Pictures. *Communications of the ACM*, 1975, **18**(6), 311–317.
 41. BLINN, James F. Models of light reflection for computer synthesized pictures. V *SIGGRAPH '77 Proceedings of the 4th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*. New York, USA : AMC, 1977, 192–198.
 42. COOK, Robert L., TORRANCE, Kenneth E. A Reflectance Model for Computer Graphics. V *ACM Transactions on Graphics*, 1982, **1**(1), 7–24, doi: 10.1145/360349.360353.
 43. OREN, Michael, NAYAR, Shree K. Generalization of Lambert's reflectance model and implications for machine vision. *International Journal of Computer Vision*, 1995, **14**(3), 227–251.
 44. Introduction to Shading. V *Scratchapixel* [dostopno na daljavo]. Obnovljeno 2016 [citirano 28. 3. 2017]. Dostopno na svetovnem spletu: <<https://www.scratchapixel.com/lessons/3d-basic-rendering/introduction-to-shading/reflection-refraction-fresnel>>.
 45. BLESIOUS, Leonhard, WEIRICH, Frank. The use of the Minnaert correction for land-cover classification in mountainous terrain. *International Journal of Remote Sensing*, 2005, **26**, 3831–3851.
 46. KHUNGURN, Pramook, SCHRODER, Daniel, ZHAO, Shuang, BALA, Kavita, MARSCHNER, Steve. **Matching real fabrics with micro-appearance models**. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 2015, **35**(1), 1–26, doi: 10.1145/2818648.
 47. XIAO, Bei, BRAINARD, David H. Surface gloss and color perception of 3D objects. *Visual Neuroscience*, 2008, **25**(3), 371–85, doi: 10.1017/S0952523808080267.
 48. *Open Spource Color Management* [dostopno na daljavo]. Sony Piscures Image works, 2010 [citirano 28. 3. 2017]. Dostopno na svetovnem spletu: <<http://opencolorio.org/>>.
 49. *Blender 2.64 : Color Management* [dostopno na daljavo]. Blender.org, 2014 [citirano 28. 3. 2017]. Dostopno na svetovnem spletu: <http://wiki.blender.org/index.php/Dev:Ref/Release_Notes/2.64/Color_Management>.