

Vnímanie a pomenovávanie farieb a farebných kategórií

Kristína REBROVÁ a Martin TAKÁČ¹

Abstrakt. Kategorizácia je jednou z mnohých populárnych tém na poli kognitívnych vied, pokladaná za esenciálny mechanizmus myslenia a kognície ako takej. Skutočnosť, že vnímanie farieb je univerzálnou črtou ľudskej vizuálnej percepcie, nám umožňuje skúmať a porovnávať kategorizáciu farieb v akejkoľvek kultúre či jazyku, či umelom systéme. Cieľom tejto kapitoly je opísať základné mechanizmy vnímania farieb, teórie o tom, ako ich rozlišujeme a pomenúvame a predstaviť najvýznamnejšiu svetovú štúdiu pomenovania farieb World Color Survey. Dáta z tejto štúdie boli použité v simulácií kategorizácie farieb na báze sémantiky rozlišovacích kritérií, ktorá uzatvára túto kapitolu ako aplikačný pohľad na problematiku.

1 Úvod

Kategorizácia, teda proces, v ktorom narábame s rozličnými entitami ako s rovnakými, je esenciálnym mechanizmom myslenia a kognície ako takej [32]. Umožňuje nám rozlišovať objekty vo svete a vzťahy medzi nimi. Podieľa sa na vnímaní, chápaní, usudzovaní, plánovaní, reči a rôznych ďalších základných kognitívnych aktivitách. Jednou z možných ciest ku pochopeniu ľudskeho myslenia a usudzovania je skúmanie kategorizácie v jazyku [15]. Skutočnosť, že vnímanie farieb je univerzálnou črtou ľudskej vizuálnej percepcie, nám umožňuje skúmať kategorizáciu a pomenovávanie farieb v akejkoľvek kultúre, jazyku, či umelom biologicky motivovanom systéme a výsledky z takýchto skúmaní navzájom porovnávať, hľadať všeobecné mechanizmy a odlišnosti.

Od začiatku druhej polovice minulého storočia sa sformulovalo viacero hypotéz o tom, ako rozlišujeme a pomenúvame farby. Vo všeobecnosti ich možno rozdeliť do dvoch skupín, na univerzalistické a relativistické [12]. Relativisti tvrdia, že pomenovania pre farby a im zodpovedajúce farebné kategórie vznikajú na základe arbitrárnych jazykových konvencií. Univerzalisti naopak zastávajú názor, že každý jazyk obsahuje konečné množstvo základných farebných termínov, pričom zodpovedajúce farebné kategórie, charakteristické ich farebným rozsahom a najlepšími reprezentantmi (prototypmi), sú univerzálne pre všetky jazyky a kultúry na svete.

Cieľom tejto kapitoly je uviesť čitateľa do problematiky vnímania, rozlišovania a pomenovania farieb, predstaviť základy, na ktorých stojí univerzalistický pohľad na kategorizáciu farieb a s ním súvisiaci model kategorizácie farieb inšpirovaný prototypovou teóriou [24]. Najprv popíšeme základné teórie o vnímaní farieb, ktoré boli sformulované ešte pred objavením svetlocitlivých buniek a vizuálnych neurálnych ciest,

¹ Katedra aplikovanej informatiky FMFI UK, Mlynská dolina, 848 48 Bratislava, E-mail: kristina.rebrova@fmph.uniba.sk, takac@ii.fmph.uniba.sk

no napriek tomu dobre popisujú princíp fungovania vnímania farieb ako taký. Najmä druhá z nich, teória opozičných procesov, zohráva dôležitú úlohu pri skúmaní kategorizovania farieb. Základné farby, ktoré definuje, sa považujú za jadro univerzálnej množiny základných farebných kategórií a opozične procesy, ktoré medzi nimi pôsobia za mechanizmus na pozadí vzniku farebných termínov v jazyku.

Ďalej popíšeme fyziológiu a fenomenológiu farebného vnímania, aspekty dôležité pre získanie jednotného pohľadu na vnímanie a rozlišovanie farieb, teda na ich perceptuálnu kategorizáciu. Zdanlivým odbočením bude časť o farebných modeloch a priestoroch, ktorá hovorí o tom, ako farby reprezentujeme matematickým spôsobom. Možnosť exaktnej reprezentácie farieb je však veľmi dôležitá pre to, aby sme ich mohli objektívne porovnávať, zaznamenávať a skúmať naše reakcie na ne. Túto obsahovo najbohatšiu časť kapitoly zavšíme krátkym úvodom do fenoménu kategorizácie ako takej, prototypovej teórie a lexikálnej kategorizácie farieb s priamou nadväznosťou na tretiu časť. Tá už bude priamo pojednávať o hlavnej teórii o základných farebných kategóriách formulovanej v roku 1969 a o svetovej farebnej štúdií (WCS) vytvorenej pre získanie silnej empirickej podpory pre túto teóriu. Popíšeme jej metodológiu, výsledky a ich využitie, teda najvýznamnejšie štúdie pre potvrdenie univerzalistických hypotéz.

V poslednej časti predstavíme model kategorizácie farieb založený na prototypovej teórii, konkrétne na sémantike rozlišovacích kritérií a z neho vytvorenú simuláciu natrénovanú na dátach z WCS. Cieľom tejto časti je nielen ukázať vhodný mechanizmus pre modelovanie kategorizácie farieb, ale tiež overiť kategorizačnú schopnosť rozlišovacích kritérií pomocou reálnych dát.

2 Vnímanie farieb

Otázka definovania farby ako takej je v mnohých ohľadoch diskutabilná. O farbe môžno povedať, že je to vlastnosť alebo vedľajší produkt svetla – elektromagnetického žiarenia s vlnovou dĺžkou od 380nm do 740nm, ktoré dopadá na sietnicu oka a je ďalej spracúvané perцепčným aparátom, ktorý produkuje zmyslový vnem [32]. Keď hovoríme o farbe objektu, myslíme tým vlastne vlnovú dĺžku svetla, ktoré tento objekt odráža. Je všeobecne známe, že materiál, o ktorom hovoríme, že je svetlý, odráža viac svetla ako tmavý materiál. Takto popisujeme farbu na základe jej vzniku, vnemu a fyzikálneho pôvodu.

Farba je však tiež vlastnosťou ľudskeho mozgu alebo mysle. Farbu si totiž vieme predstaviť aj bez použitia perцепčného systému. Preto väčšinou definujeme farbu nepriamo ako psychologický vnem s tromi komponentmi – odtieňom, jasom a saturáciou [9]. Odtieň sa vzťahuje na kvalitu tohto vnemu, teda určitú farebnú hodnotu, ktorú vyjadrujeme rôznym spôsobom. Jas alebo svetlosť sú dva pojmy, ktoré vystihujú to, aké množstvo svetla zdanlivo vychádza z objektu, na ktorom farbu pozorujeme. Jas charakterizuje vlastnosť farby ako takej a svetlosť zas vlastnosť povrchu objektu, na ktorom farbu pozorujeme. Saturácia, chroma alebo farebnosť sú tri pomenovania pre sýtosť resp. šedosť farby. Čím je saturácia vyššia, tým je farba sýtejšia.

Rozsah elektromagnetického žiarenia, ktoré je pozorovateľné ľudským okom, nazývame viditeľné (optické) spektrum alebo jednoducho svetlo. Bežným omylom je predstava, že vlnová dĺžka pôsobiaceho svetla priamo určuje, akej farby budú predmety, ktoré toto svetlo osvetľuje. Je tomu tak väčšinou len v prípade takzvanej voľnej farby, kedy uvažujeme akoby absolútnu hodnotu svetla resp. farby bez porovnania s okolím. No v princípe náš percepčný systém nevie vnímať absolútne vlnové dĺžky alebo jas, iba ich porovnávať vzhľadom na rôzne časti scény. Text v tejto časti (2.1 až 2.5) bude vychádzať prevažne z [6] a [8].

2.1 Základné teórie vnímania farieb

Počas histórie skúmania farebného videnia boli popísané dva základné a navzájom si odporujúce princípy, a to trichromatická teória a teória opozičných procesov.

Trichromatická alebo Young-Helmholtzova teória vnímania farieb je založená na pokusoch s miešaním farieb a tvrdí, že v oku existujú práve tri typy farebných receptorov (červený, modrý, zelený), ktoré posielajú do mozgu informáciu o farbe vnímaného svetla a tiež to, že tieto 3 farebné kanály sú potrebné ale aj postačujúce pre namiešanie akejkoľvek farby. Napriek tomu, že sa opiera o výsledky z mnohých experimentov a že ju môžeme nájsť aj vo fyziológii ľudského oka, trichromatická teória nevie vysvetliť existenciu fenoménu opozičných farieb (viď nižšie) a farebných paobrazov². Tiež nevie vysvetliť to, že ľudia s poruchou vnímania jednej zo základných farieb, dichromati (viď nižšie) môžu vidieť bielu a žltú farbu, aj napriek tomu, že ich bez tretieho kanálu nie je možné namiešať.

Teória opozičných procesov tiež hovorí o troch základných kanáloch farebného vnímania, ktoré sú však úplne inej povahy. Ide o kanály párov takzvaných opozičných farieb, ktoré nikdy nie je možné vnímať súčasne. Sú to zelená – červená, modrá – žltá a čierna – biela. Neexistuje nič také ako červenkastá zelená alebo žltkastá modrá. Zmiešaním týchto dvoch opačných farieb dostaneme farbu neutrálnu, teda pri akomkoľvek miešaní neutralizuje jedna z páru opačných farieb druhú. Tento princíp je konzistentný s farebnými paobrazmi (červený obraz indukuje zelený paobraz) a korešponduje aj s ľudským vnímaním. Reakcie na opačné páry farieb sa pri spracúvaní fotoreceptormi navzájom inhibujú. Opozičné procesy fungujú aj na úrovni neurálnych ciest.

Napriek tomu, že mali tieto teórie sprvu snahu si konkurovať, ani jedna z nich nie je samostatne postačujúca pre vysvetlenie celého princípu farebného vnímania. Ako bližšie popíšeme v ďalšej časti, v ľudskom oku sú skutočne práve tri typy farebných

²Termín paobraz alebo afterimage sa používa na pomenovanie efektu, pri ktorom sa nám pred očami zjaví niečo ako negatív pozorovaného obrazu – paobraz, ktorý nie je výsledkom priameho vizuálneho vnemu (môžeme pri tom aj zavrieť oči) ale predchádzajúceho zosilneného vnemu, napríklad jasnosťou obrazu a dĺžkou vystavenia obrazu oku. Tento efekt sa používa napríklad pri optických ilúziách. Pri vnímaní farieb spôsobuje silný vnem jednej z opozičných unikátnych farieb – zelenej, červenej, modrej, žltej, čiernej a bielej paobraz opačnej farby.

receptorov, avšak ich vzájomné pôsobenie umožňuje aj opozičné procesy, ktoré sa ďalej prenášajú vyššie do mozgu a pôsobia aj na konečné spracovanie farebného vnemu.

2.2 Fyziológia farebného vnímania

Ľudský vizuálny percepčný systém funguje na princípe absorpcie svetla špeciálnymi receptormi, bunkami citlivými na svetlo [18]. Fotoreceptory spracúvajú jednotlivé dávky svetelnej energie, čiže fotóny dopadajúce na sietnicu. Rozlišujeme dva druhy fotoreceptorov – čapíky a tyčinky – pomenované podľa ich charakteristického tvaru. Za vnímanie farieb zodpovedajú čapíky, ktoré sú citlivejšie, ale aj náročnejšie na svetlo.

Na rozdiel od väčšiny cicavcov vníma človek farby tromi druhmi čapíkov. Tie možno rozlíšiť podľa vlnovej dĺžky svetla, na ktoré reagujú. Delíme ich na červené, zelené a modré alebo L, M a S-čapíky. Červené alebo L-čapíky (long-wavelength sensitive cones) vnímajú svetlo s veľkou vlnovou dĺžkou od 500 nm po 700 nm s vrcholom citlivosti okolo 564-580 nm. Zelené M-čapíky reagujú na o niečo kratšiu vlnovú dĺžku, 450-630 nm s vrcholom okolo 534-545 nm a modré S-čapíky na svetlo krátkej vlnovej dĺžky 400-500 nm s vrcholom okolo 420-440. Všetky majú rôzne, no prelínajúce sa citlivosti. Dôležitým faktom je, že čapík akéhokoľvek druhu môže určiť intenzitu a vlnovú dĺžku svetla k nemu prichádzajúceho len v porovnaní s jedným alebo viacerými inými typmi čapíkov.

Červené a zelené čapíky zabezpečujú vnímanie spektra s väčšími vlnovými dĺžkami a vo všeobecnosti zodpovedajú za rozlišovanie svetlého a tmavého. Krátkovlnné, modré čapíky sa naopak používajú na vnímanie farebného kontrastu, preto ich je asi desaťkrát menej než ostatných. V princípe sú si dva druhy dlhovlnných čapíkov veľmi podobné a majú spoločný farebný základ - žltú farbu. Červené čapíky sú teda červeno-žlté a zelené zeleno-žlté. Tento princíp súhlasí s oboma uvedenými farebnými teóriami a korešponduje aj s rozdelením najsvetlejšej časti farebného spektra, žltej farby, na dve časti – zelenkastú a červenkastú. Trivariancia umožňuje miešaním paralelného zeleno-červeného a modro-žltého systému vnímanie viacerých farieb, ako napríklad magenta (svetlá fialová) alebo cyan (zeleno-modrá, svetlá tyrkysová), ktoré nie sú súčasťou farebného spektra.

Svetelný stimul sa po spracovaní čapíkmi prenáša cez optický nerv do talamu napojeného na bočné kolienkovité telieska (LGN). V ňom sa v súlade s teóriou opozičných procesov prenáša do primárnej vizuálnej kôry (V1) červeno-zelený signál pomocou parvocelulárneho kanálu a modro-žltý pomocou koniocelulárneho [3]. Cez tieto kanály sa môže šíriť signál len pre jednu z páru vzájomne sa inhibujúcich farieb, preto skutočne nie je možné vnímať zelenkastú červenú a podobne. Opozičné procesy fungujú aj v primárnej vizuálnej kôre, kde sa signál spracúva dvojitémi opozičnými bunkami, ktoré sa združujú v špeciálnych valčekovitých štruktúrach (blobs). Tieto špeciálne opozičné bunky reagujú na množstvo zelenej a červenej farby v rôznych častiach scény s tým, že najlepšie reagujú, ak sú farby objektov kontrastné (zelená vedľa červenej). Z tejto oblasti sa signál šíri ďalej do V2 a V4, až sa dostane do spodnej časti spánkového laloku (IT kôra), ktorá integruje informáciu o farbe s informáciou o tvare a iných

priestorových vnemoch. Cesta cez oblasti V1 – V2 – V4 po IT kôru sa nazýva ventrálna alebo „čo“ dráha, ktorá zodpovedá za rozlišovanie farieb, detailov, textúr, tvárí, udržanie pozornosti a celkovo slúži na identifikáciu a kategorizáciu objektov spracúvaných vizuálnym percepčným systémom [31].

2.3 Poruchy vnímania farieb

Existuje sedem typov porúch vnímania farieb spôsobených odchýlkou v citlivosti alebo úplnou absenciou niektorých druhov farebných čapíkov. Vrodenou poruchou vnímania farieb trpí na svete približne 8% mužov a približne 0.5% žien [25].

Prvou a najbežnejšou je anomálna trichromacia. Človek trpiaci touto poruchou má síce všetky tri druhy farebných čapíkov, avšak jeden z nich je zastúpený v menšom počte, s menším množstvom pigmentu alebo nastavený na neobvyklú vlnovú dĺžku. Preto dochádza k zmenenému farebnému vnemu najmä pri jasnejších alebo viac satureovaných odtieňoch základných farieb, najčastejšie červenej a zelenej. Ak je porucha protanomalická, dochádza k posunu citlivosti na vlnovú dĺžku od červenej k zelenej, teda niektoré objekty, ktoré zdravé oko vidí ako červené (príp. oranžovej alebo podobnej farby) sa javia zelené alebo zelenkasté. Pri najbežnejšej, deuteranomalickej poruche je oslabená zelená farba. Tritanomália, porucha modrých čapíkov, sa vyskytuje len zriedka.

Ďalším typom poruchy vnímania farieb je dichromacia, teda úplná absencia jedného z troch typov čapíkov. O ľuďoch trpiacich touto poruchou možno povedať, že sú skutočne farboslepí, pretože nemôžu za žiadnych okolností vnímať určité farebné odtiene. Niektorí dichromati používajú na rozoznávanie zelenej a červenej farby slabšie receptory – tyčinky, ktoré zdravý človek používa len na rozlíšenie tmavého a svetlého. Pri tejto poruche existujú opäť tri typy protanopia, deuteranopia a tritanopia, teda absencia červených (protanopia), zelených (deuteranopia) alebo modrých (tritanopia) čapíkov.

Posledným typom je monochromacia, veľmi zriedkavá porucha, pri ktorej chýbajú až dva druhy farebných čapíkov. Človek trpiaci touto poruchou vidí akoby čiernobielo s určitým farebným odtieňom podľa toho, ktorý typ čapíkov má. Podobná, tiež málo sa vyskytujúca je achromacia – úplná absencia farebných čapíkov. Človek trpiaci touto poruchou vníma len tyčinkami, je ochudobnený nielen o vnem farby, ale aj o ostrosť a jas videnia.

2.4 Fenomenológia farebného videnia

Pri najlepších optických podmienkach existuje zhruba milión rozlíšiteľných farieb – kombinácií rôznych odtieňov, saturácie a jasú [9]. Ľudské oko je schopné rozlíšiť okolo 150 spektrálnych odtieňov a okolo 450 odtieňov šedej. Tento počet môžeme ešte obohatiť o mimospektrálne farby, ktoré vznikajú miešaním spektrálnych farieb, zmenou kontrastu a podobne.

Rozlišovanie farieb je ovplyvnené priestorovou separáciou porovnávaných objektov, počtom dimenzií, v ktorých sa farby líšia, polohou farby vo farebnom spektre, veľkosťou pozorovaného objektu, saturáciou a jasom. Tiež záleží na časovom odstupe od

vzhľadnutia farby. Najlepšie si zapamätáme farby, ktoré sú dobrými reprezentantmi, na ich rozpoznanie nám stačí kratší čas. Lepšie rozlišujeme farby v prípade, že máme medzi daným objektom a jeho farbou vžitú asociáciu, napríklad červené jablko, zelená tráva a podobne. Pri rozpoznávaní farby objektu je dôležitá aj jeho poloha vzhľadom na sieťnicu.

Je dôležité uvedomiť si, že vizuálny percepčný systém rozlišuje farby nie na základe absolútnych vlnových dĺžok, ale porovnávaním vlnových dĺžok a jasú prichádzajúceho z rôznych častí scény, teda ide podobne ako pri iných aspektoch vizuálnej percepcie o rozlíšenie objekt – pozadie.

Farba vnímaného objektu sa odvíja aj od farby pozadia, čiže sa nám môže zdať na rôznych pozadiach vždy trochu iná, aj keď objekt a osvetlenie sú rovnaké. Jedným z efektov, ktoré vyvoláva pozadie objektu, je takzvaný princíp simultánneho farebného kontrastu, pri ktorom môže pozadie vyvolať dojem, že má objekt ľubovoľnej farby farebný nádech doplnkovej farby k farbe pozadia. Napríklad na jasne červenom pozadí sa môže objekt javiť zelenší a na modrom zase žltší. Tento princíp najlepšie funguje vtedy, keď tvorí farba objektu a farba pozadia dvojicu opozičných farieb. Na druhej strane, keď ide o odtiene podobné, môže pozadie vnímanú saturáciu farby objektu znižovať. Teda ak sú objekt a pozadie podobných odtieňov a pozadie je jasné, objekt sa zdá poznateľne šedší než na neutrálnom pozadí. Farba pozadia môže farbu objektu tiež zdanlivo stmaviť alebo zosvetliť. Tmavé pozadie objekt zosvetlí a svetlé stmaví. Ak je objekt a pozadie podobnej farby a svetlosti (napríklad čierny objekt na tmavomodrom pozadí), nastáva takzvaný asimilačný efekt – splynutie objektu s pozadím.

Ďalší z faktorov vplývajúcich na vnímanie farieb je veľkosť pozorovaného objektu, respektíve veľkosť jeho obrazu na sieťnici. Čím je objekt na sieťnici menší, tým je jeho farba ťažšie rozlíšiteľná. Tmavé farby (napr. modrá) konvergujú k čiernej a svetlé (napr. žltá) zas k bielej.

Jasnosť farby závisí na mnohých faktoroch. Ovplyvňuje ju svietivosť materiálu, pozadie, vlastnosti osvetlenia a prispôsobivosť pozorovateľa naň, dĺžka trvania pohľadu na daný objekt a jeho veľkosť. Bezold-Brückov posun je jav, pri ktorom dochádza k zmene vnímania farebného odtieňa spôsobenej zmenou intenzity osvetlenia. So stúpajúcim jasom osvetlenia sa spektrálne farby s vlnovou dĺžkou pod 500nm posúvajú k modrej a nad 500nm k žltej (napr. objekt červenej farby sa bude javiť červeno-oranžový).

Pri slabom osvetlení sa sieťnica stáva citlivejšou na kratšie vlnové dĺžky a menej citlivou na dlhšie. Napríklad modrá a červená kvetina, ktoré majú za denného svetla rovnaký jas, sa za šera budú výrazne líšiť. Modrá kvetina ostane rovnako jasná alebo bude vyzeráť ešte jasnejšie, no červená bude tmavá, až nerozlišiteľná. Táto adaptácia sa nazýva Purkyněho efekt.

K posunu vo vnímaní farieb, konkrétne farebného odtieňa, dochádza aj vtedy, ak do monochromatického (jednofarebného) osvetlenia pridáme biele svetlo. Ide o takzvaný Abneyho efekt. Ak nám napríklad svieti modré svetlo na biele pozadie, pridaním bieleho svetla do svetelného zdroja sa nám pozorovaná farba bude zdať fialovejšia, zelená žltšia a červená ružovejšia. Napriek tomu, že by sme očakávali len nárast svetlosti farby, dochádza aj k zdanlivému zníženiu vlnovej dĺžky (posun v spektre smerom doľava).

Zaujímavé je, že k tomuto efektu dochádza len v ľudskom oku, prístrojmi sa zachytiť nedá [19].

Chromatická adaptácia alebo stálosť farby je vlastnosť našej percepcie, pri ktorej pozorovaná farba vychádza nielen z bezprostredného vnemu, ale aj z predošlej skúsenosti. Na základe tejto vlastnosti si za akýchkoľvek svetelných podmienok adaptujeme náš percepčný systém tak, že rozoznávame farbu daného objektu stále rovnako. Princíp tohto javu sa zakladá na fakte, že percepcia farby objektu nezávisí len od vlnovej dĺžky svetla, ktoré naň dopadá, ale hlavne od vlnovej dĺžky žiarenia odrážaného povrchom objektu putujúceho do oka pozorovateľa. Rôzne zdroje svetla produkujú žiarenie s rôznou spektrálnou kompozíciou. Správne proporcie všetkých vlnových dĺžok má len slnečné žiarenie. Klasické žiarovky s volfrámovým vláknom vytvárajú skôr žiarenie dlhovlnné, ladené do červena, naopak žiarivky produkujú skôr krátkovlnné, modré svetlo. Rôzne spektrálne kompozície konkrétnych zdrojov svetla potom spôsobujú, že materiál odráža svetlo inak a teda logicky má inú farbu. Naš percepčný systém sa svojím spôsobom takýmto zmenám prispôbuje. Adaptácia na svetlo spôsobuje, že pri prevažne dlhovlnnom osvetlení strácame citlivosť na dlhovlnné svetlo, no nie na krátkovlnné, pretože modré čapíky žiarenie s väčšou vlnovou dĺžkou nevnímajú. Toto prispôbovanie je do určitej miery obmedzené. Pri bežných podmienkach má slnečné žiarenie na obed charakter krátkovlnného žltého svetla a večer dlhovlnného červeného. V tomto osvetlení bude červené jablko stále červené, pretože jeho pigment odráža červené svetlo. No keď ho osvetlíme modrým svetlom, bude sa javiť tmavošedé alebo čierne, pretože na jeho povrch nebude dopadať žiadne červené žiarenie.

Chromatická adaptácia môže podobne ako efekty farby pozadia spôsobiť indukovanie doplnkovej (opozičnej) farby. Napríklad adaptácia zraku pohľadom na červený štvorec môže spôsobiť, že následne pozorované objekty žltej alebo bielej farby budú vyzerať zelenkasto. Tento jav môže tiež znížiť zdanlivú saturáciu, alebo posilniť či znížiť jasnosť. Keď sa napríklad zrak adaptuje na jasnú scénu, následne vzhliadnutá tmavšia scéna bude vyzerať tmavšie než bežne.

2.5 Reprezentácia farieb: farebné modely a priestory

Ako sme uviedli vyššie, farbu väčšinou definujeme nepriamo ako psychologický vnem s tromi komponentmi. Či už sú tieto charakteristické údaje o farbe v zložení: odtieň, jas a saturácia, alebo iné číselné alebo inak exaktne vyjadriteľné parametre, vytvárame z nich štruktúry a tak popisujeme rôzne farebné priestory. Farebný priestor si môžeme predstaviť ako štandardný Euklidovský vektorový priestor, ktorého osi reprezentujú vlastnosti alebo základné zložky farby. V tejto časti popíšeme najznámejšie farebné modely a priestory, ich význam a využitie.

Pojem farebného priestoru sa často stotožňuje s farebným modelom, čo je abstraktný matematický model reprezentujúci farby ako štruktúry s tromi niekedy štyrmi číselnými parametrami vystihujúcimi komponenty farby. V skutočnosti ale pojem farebného priestoru zahŕňa nielen štruktúru, ale aj mapovaciu funkciu do absolútneho farebného priestoru, teda do reálneho sveta. V absolútnom farebnom priestore je každá

farba jednoznačná, teda jasne definovaná bez odvolávania sa na externé faktory. Farebný priestor charakterizuje jeho *gamut*, čo je množina všetkých farieb (všetkých možných hodnôt vektorového priestoru), ktoré popisuje. Je dôležité uvedomiť si, že gamut sa odvíja od štruktúry a realizácie farebného priestoru.

Vo všeobecnosti rozlišujeme z hľadiska miešania farieb dva princípy. Aditívny farebný model alebo RGB funguje na princípe miešania troch základných farieb spektra – červenej, zelenej a modrej. Toto spájanie je založené na skladaní frekvencií svetelných zdrojov, práve preto sa tento systém volá aditívny. Postupným skladaním dostaneme najsvetlejšie – biele svetlo. Tento systém síce čiastočne korešponduje s našou perцепčnou sústavou, no z fyzikálneho hľadiska bežne nefunguje. Napriek tomu si tento model našiel široké uplatnenie pri elektronických zariadeniach ako monitory počítačov, televízne obrazovky alebo všeobecne pri osvetľovaní tmavých scén, napríklad v divadle.

Najznámejšie farebné priestory založené na tomto modeli sú sRGB a AdobeRGB. Gamut alebo hustota farebného priestoru opísaného RGB modelom závisí od jeho implementácie. Najbežnejšia je 24-bitová implementácia, pri ktorej na každú farebnú zložku pripadá 8 bitov, teda 256 rôznych hodnôt na 1 zložku (0..255). Každý farebný priestor založený na 24-bitovom RGB modeli má potom presne stanovený gamut - $256 \times 256 \times 256 \approx 16.7$ miliónov farieb. Niektoré implementácie používajú kvôli zväčšeniu hustoty diskretných farieb na vyjadrenie jednej zložky 16 bitov, čo sa potom využíva pri konvertovaní alebo porovnávaní s „hustejšími“, zložitejšími farebnými priestormi (viď nižšie).

Subtraktívny farebný model pracuje na opačnom princípe ako aditívny. Najlepším príkladom tohto modelu sú tlačene farby, ktoré vidíme na bielom papieri. Farba je v tomto modeli reprezentovaná ako svetlo tých frekvencií, ktoré nie sú povrchom absorbované. Čím viac farieb spojíme, tým tmavšia farba vznikne, pretože sa pridá ďalšia frekvencia do spektrálnej kompozície odrážaného svetla. Tomuto modelu hovoríme subtraktívny preto, lebo každá farba odráža jej príznačné svetlo a absorbuje žiarenie iných frekvencií. Základné komponenty tohto farebného modelu sú svetlé farby – tyrkysová (cyan), žltá (yellow) a fuchsiová (magenta). Ich zmiešaním po pároch vzniká červená, zelená a modrá. Kompletným zmiešaním týchto základných farieb však nemôžeme dostať čiernu, len niečo, čo sa na ňu podobá. Preto sa pri tlačené nestavia na modeli CMY ale CMYK, kde sa pridáva samostatná čierna farba. Podobne ako z RGB aj z tohto modelu existuje mnoho odvodených farebných priestorov pre rôzne sady atramentov a charakteristík tlače.

HSV/HSB, hue (odtieň), saturation (saturácia), value/brightness (jas) alebo lightness/luminance (svetlosť) pri HSL modeli, sú tri parametre vystihujúce farbu tak, ako si ju prirodzene predstavujeme, teda na základe odtieňa, saturácie a jasu alebo svetlosti. Základný rozdiel medzi týmito dvoma modelmi je v poslednom parametri, ktorý sa môže na prvý pohľad javiť rovnaký. V skutočnosti pojem jasu poukazuje na jasnosť farby a svetlosť zas hovorí o vlastnosti materiálu. Oba tieto farebné modely sú odvodené od RGB a teda aj ich realizácia prostredníctvom farebného priestoru je závislá na konkrétnom farebnom priestore RGB. Môžeme ich popísať ako nelineárne deformácie farebnej RGB kocky, pričom HSV možno graficky znázorniť ako farebný kužeľ a HSL

ako dvojitý kužeľ, dvojitý hexagonálny kužeľ alebo guľu. Prvá zložka u oboch modelov, farebný odtieň, sa zobrazuje do kruhu, pričom ďalší rozmer, saturácia, klesá od okraja smerom do stredu a jas stúpa smerom nahor. HSV/HSB sa používajú v počítačových programoch, práve pre ich názornosť a jednoduchosť.

Biologický model farebnej percepcie je takzvaný trojzložkový farebný model, ktorý si môžeme predstaviť ako trojrozmerný euklidovský priestor. V ňom sú osi x , y , z , priradené trom druhom farebných receptorov, dlhovlnným (L), stredno-vlnným (M) a krátkovlnným (S) čapíkom. Počiatočný bod $(S,M,L) = (0,0,0)$ prislúcha čiernej farbe. Biela nie je v rámci tohto priestoru jasne definovaná, pretože sa skôr vzťahuje na požiadavku vyváženej bielej (white balance) alebo na stav osvetlenia v priestore. Ľudský trojzložkový farebný priestor má tvar pokriveného kužeľa siahajúceho akoby do nekonečna. V skutočnosti možno extrémnymi svetelnými intenzitami náš perцепčný systém presaturovať ale aj poškodiť. K styku s takýmto extrémnym osvetlením pri bežných podmienkach vôbec nedochádza.

Najsýtejšie, teda najviac saturované farby sa v tomto priestore nachádzajú na vonkajšom okraji. Zaujímavý je fakt, že v skutočnosti neexistuje hnedé alebo šedé svetlo, len oranžové a žlté svetlo s intenzitou nižšou ako v okolitých častiach fyzického priestoru, v ktorom sa pozorovateľ nachádza. Trojzložkový farebný model má charakter aditívneho miešania farieb, pričom ide o skladanie vektorov na základe Grassmanovho zákona. Ten hovorí, že ak je daná farba kombináciou dvoch monochromatických farieb (s jednou vlnovou dĺžkou), potom jej vnímaná hodnota, prevedená do farebného priestoru, je sumou hodnôt dvoch farieb, z ktorých vznikla.

Jedným z prvých reálnych biologicky motivovaných farebných priestorov bol CIE 1931 XYZ, vytvorený Medzinárodnou komisiou pre ilumináciu (Commission Internationale de l'Eclairage) v roku 1931. Bol vytvorený na základe experimentálnych meraní, ktoré spočívali v nastavovaní pomerov, resp. množstva farebného žiarenia pri aditívnom miešaní troch základných odtieňov – červenej, modrej a zelenej s nastaviteľnou úrovňou jasu. Každý proband dostal najprv farebnú vzorku – ukážku, ktorú potom použitím mechanického zariadenia namiešaval – modeloval (matching) zo základných farieb. Na rozdiel od RGB systémov je rozsah číselných hodnôt parametrov X , Y , Z priestoru CIE 1931 je pre každú dimenziu iný. Parameter X sa pohybuje v rozmedzí od 0 do 95.047, Y od 0 do 100.000 a Z od 0 do 108.883. Najväčším problémom farebného systému CIE 1931 je, že neposkytuje priamy spôsob na vyjadrenie perceptuálnych rozdielov medzi farbami.

Perceptuálny farebný priestor [11] je taký, v ktorom je vzdialenosť medzi dvoma diskretnými hodnotami (farbami) úmerná tomu, ako by ich rozdielnosť alebo podobnosť vnímal ľudský perцепčný aparát. Rozdielne farby sú od seba v priestore ďaleko, podobné zas blízko.

Pravdepodobne najznámejší perceptuálny farebný priestor je $CIE L^*a^*b^*$, založený na nelineárnej transformácii biologicky motivovaného $CIE XYZ$ a Teórii opozičných procesov. Podobne ako HSL a HSV používa prirodzenejší spôsob vyjadrovania farieb a to pomocou farebných odtieňov a svetlosti. Prvý komponent L^* reprezentuje jas farby (luminance), komponenty a^* a b^* vyjadrujú farebný odtieň

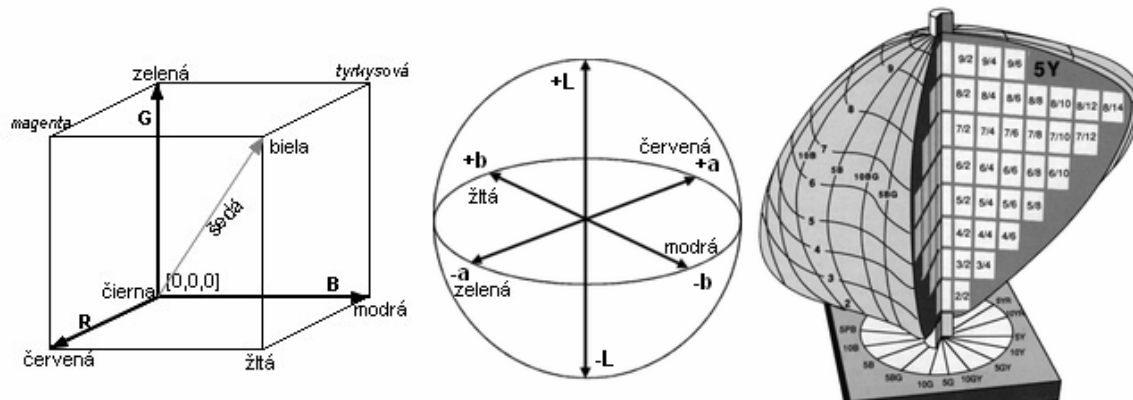
dvojrozmerným spôsobom na základe opozičných farieb. Rozsah komponentu L^* je od 0 (čierna) do 100 (biela). Komponent a^* hovorí o pozícii farby medzi zelenou a magentou (fuchsiovou), pričom negatívne hodnoty tohto parametra indikujú zelenú a pozitívne magentu. Podobne b^* sa pohybuje medzi modrou v negatívnych hodnotách a žltou v pozitívnych. Hodnota a^* a b^* sa bežne pohybuje v rozmedzí -128 až +128. Všimnime si, že systém navrhnutý tak, že skutočne korešponduje s teóriou opozičných procesov, pretože v ňom nie je možné vyjadriť nikdy namiešať zelenkastú červenú alebo žltomodrú. V bode, v ktorom sú koordináty a^* a b^* na nule, sa nachádza takzvaný šedý bod zastupujúci odtiene šedej (v rôznych stupňoch svetlosti).

Nelineárne vzťahy medzi tromi komponentmi tohto farebného systému sú vytvorené tak, aby napodobňovali logaritmické reakcie ľudského oka. Na rozdiel od CIEXYZ je tento systém závislý od stanovenia bieleho bodu (white point). Kým nie je tento údaj stanovený, nemôže tento priestor definovať absolútne farby. Bežne sa však biely bod určuje podľa štandardu vzhľadom na systém, resp. aplikáciu, ktorá tento farebný priestor používa. Napríklad pri bežnom grafickom software (napr. Adobe Photoshop) sa najviac používa norma CIE standard illuminant D50.

Farebný priestor CIEL*a*b* je možné znázorniť viacerými spôsobmi, obvykle sa používa kruhový tvar možných farebných odtieňov. Zobrazuje sa ako guľa s tromi na seba kolmými osami reprezentujúcimi jeho koordináty. Tiež sa zvykne zobrazovať čiastočne, pre jednu alebo viac hodnôt parametra jas L^* ako kruh, niekoľko kruhov na osi L^* , výsek z gule a podobne.

Ďalším významným perceptuálnym priestorom je Munsellov farebný systém, ktorý budeme spomínať aj v ďalšej časti tejto kapitoly v súvislosti so svetovou farebnou štúdiou (WCS). Tento komerčný farebný priestor vznikol v prvej polovici 20. storočia a jeho autorom bol Albert H. Munsell. Základnými zložkami tohto modelu sú podobne ako pri HSL a HSV modeloch tri zložky prirodzene popisujúce farbu a to: odtieň, hodnota (svetlosť) a chroma, čo je parameter zhruba korešpondujúci so saturáciou (sýtosťou farby). Podobne ako farebné priestory CIE, je aj tento založený na experimentálnom meraní.

Munsellov systém definuje päť základných farebných odtieňov – červenú, žltú, zelenú, modrú a fialovú. V druhom stupni definuje ďalších päť odtieňov, teda 10 základných odtieňov, z ktorých je každý ešte rozdelený na 10 podúrovní, čo spolu dáva 100 číselných hodnôt pre rôzne farebné odtiene. Najčastejšie sa zobrazuje ako kruhovitý teleso, kde jeden kruhový výsek reprezentuje jeden odtieň (viď obrázok nižšie). Doplňkové farby teda ležia oproti sebe a aditívnym zmiešaním produkujú neutrálnu šedú s rovnakým jasom. Hodnota, alebo jas sa mení vertikálne zdola nahor a má len 10 úrovní (0 je čierna a 10 biela). Chroma, zobrazovaná po kružnici s hodnotami meniacimi sa smerom od stredu reprezentuje čistotu farby, pričom v samom strede je saturácia nulová. Tento parameter nemá žiadne horné obmedzenie, maximálne dosahuje okolo 30 úrovní. Rôzne časti farebného priestoru majú rôzne maximálne hodnoty tohto parametra. Napríklad žlté farby majú viac rôznych hodnôt ako svetlá fialová, čo je podmienené povahou oka a fyzikálnymi vlastnosťami farebného stimulu.



Obr. 1. Schémy významných farebných priestorov

Obrázok vyššie zobrazuje schematický náčrt troch významných farebných priestorov, zľava RGB, CIE L*a*b* a Munsellovho farebného priestoru (obrázok prevzatý z [10]). Všimnime si, že ich tvary nie sú ani zďaleka rovnaké, čo súvisí s ich mierou výstižnosti ľudskej percepcie. Zvláštny tvar Munsellovho farebného priestoru budeme spomínať aj v časti 3.2 v súvislosti so zdôvodnením perceptuálnej dominancie niektorých farebných odtieňov.

2.6 Pomenovávanie a kategorizácia farieb

Kategorizácia je proces, v ktorom narábame s rôznymi entitami, akoby boli rovnaké [32], zaradujeme ich do kategórií. Tento mechanizmus sa uplatňuje pri vnímaní (roznávaní), usudzovaní, plánovaní, reči a mnohých ďalších kognitívnych aktivitách. Môžeme povedať, že kategorizácia je všadeprítomným a fundamentálnym javom na pozadí ľudského rozmyšľania.

Už od čias antických filozofov sa o kategóriách zmyšľalo ako o nejakých uzavretých nádobách, v ktorých sa nachádzajú prvky, ktoré majú spoločné určité vlastnosti s tým, že každý z prvkov musí spĺňať nutné a postačujúce podmienky pre začlenenie do kategórie, ktoré spätne definujú kategóriu ako takú. Podľa takéhoto prístupu prvky buď patria alebo nepatria do kategórie (Booleovská funkcia členstva v kategórii), ako je to u klasických množín. Tento pohľad na kategorizáciu bol prekonaný zhruba v polovici 20. storočia.

Na problém definatorických vlastností poukázal Wittgenstein [33] na základe konceptu hra. Všimnime si, že neexistuje jediná vlastnosť, ktorá by bola spoločná pre všetky hry, okrem tej „byť hrou“, či už ide o detské hry, šport a iné, neexistuje jednoznačná definícia. Wittgenstein v tomto prípade hovorí o takzvaných rodinných podobnostiach. Aj členovia jednej rodiny patria do jednej kategórie aj v prípade, že sa medzi nimi nenájde jedna spoločná vlastnosť. Ďalším krokom k modernej teórii kategorizácie bolo vytvorenie teórie fuzzy množín. Do množiny tohto špeciálneho druhu prvky nielen patria alebo nepatria (0 alebo 1), ale patria „do určitej miery“ vyjadrenej číslom z intervalu $\langle 0,1 \rangle$.

Najvplyvnejšou z moderných teórií kategorizácie bola prototypová teória Eleanor Roschovej [24]. Tá tvrdí, že prvky jednej kategórie nemusia mať jednu určujúcu vlastnosť, čiže môžu byť odlišné, ale majú byť vlastnosťami navzájom prepojené, napríklad ak a, b, c, d, e sú vlastnosti, tak môžeme mať kategóriu $\{ab, bc, cd, de\}$. Pomocou

špeciálnych psychologických experimentov Roschová potvrdila, že sa v kategóriách vyskytujú protypové javy a teda že existujú „najlepšie reprezentanty kategórií“, prvky, ktoré zdieľajú mnoho vlastností s ostatnými prvkami kategórie a málo s prvkami iných kategórií. Tiež objavila, že v hierarchických štruktúrach, napríklad taxonómiách, existujú takzvané kategórie základnej úrovne. Pomenúvajú ich krátke slová, ktoré sú používané častejšie než pomenovania z vyšších či nižších úrovní taxonómie. Tieto slová sú prvé, ktoré sa deti učia pri pomenovávaní okolitého sveta a prvé termíny, ktoré vznikajú pre daný koncept v jazyku. Napríklad vo vete „Pes sedel na verande“ nám ani nenapadne vymeniť slovo „pes“ za „cicavec“ (hierarchicky vyššie) alebo „labrador“ (hierarchicky nižšie, špecifickejšie slovo). Slovo „pes“ v tomto prípade tvorí kategóriu základnej úrovne. Táto úroveň nemusí byť pre všetky taxonómie rovnaká, záleží hlavne na funkčnosti a zľahčení rozlišovania, pomenovávania, komunikácie a kognície ako takej. Tento princíp funguje aj pri pomenovávaní farieb.

Kategorizáciu farieb možno rozčleniť na lexikálnu a perceptuálnu, ktoré spolu úzko súvisia. Lexikálna farebná kategorizácia spočíva v delení farebných vnemov na triedy korešpondujúce so symbolmi farebného sveta daného jazyka [32]. Perceptuálna zase triedi farby bez ohľadu na znalosť jazyka. Tento druh sme popísali v sekcii vyššie. V jazyku pomenovávame vnímané farebné kategórie pomocou farebných termínov. Priekopníci výskumu lexikálnej farebnej kategorizácie boli Berlin a Kay [2], ktorí skúmali najmä to, či sú termíny pre farebné kategórie univerzálne pre všetky jazyky na svete. Dospeli k rovnakým záverom ako Roschová, že aj v pomenovávaní farieb existujú kategórie základnej úrovne, označované základnými termínmi. Tie sú známe všetkým hovorcami daného jazyka, ktorí pomocou nich vedú konzistentne pomenovať akúkoľvek farbu. Množstvo základných farebných termínov je v jazyku obmedzené a platí pre ne, že:

1. sú monolexémické, teda nie sú zložené z iných, menších význam nesúcich slov (napríklad modrá, nie zelenomodrá)
2. sú dostatočne všeobecné, teda
 - a) nepomenúvajú farbu, ktorá už je súčasťou inej väčšej farebnej kategórie (napríklad šarlátová nie je základná, lebo je súčasťou červenej)
 - b) ich používanie nie je obmedzené na úzky okruh objektov (napríklad termín blond sa používa len pre farbu vlasov)
3. sú psychologicky významné a všeobecne známe (napríklad žltá, nie šafránová, hnedá, nie béžová a podobne)

3 Základné farebné kategórie a World Color Survey

Teória o základných farebných kategóriách bola formulovaná a publikovaná v roku 1969 v knihe „*Basic Color Terms: Their Universality and Evolution*” [2] Brenta Berlina a Paula Kaya. Tí o povahe základných farebných kategórií, resp. termínov ktoré ich pomenúvajú tvrdili nasledovné:

1. Existuje množina základných farebných kategórií s obmedzeným počtom prvkov univerzálna pre všetky jazyky.
2. Farebné termíny vystihujúce kategórie z tejto množiny pribúdajú do jazykov v presnom poradí, ktoré je možné interpretovať ako evolúciu týchto termínov.

Táto uzavretá množina pozostáva z kategórií zodpovedajúcich anglickým, ale aj našim termínom: čierna, biela, červená, zelená, žltá, modrá, oranžová, hnedá, ružová, fialová a šedá. Evolúcia farebných termínov podľa Berlina a Kaya začína pri rozdelení pomenovaní farebných vnemov na čiernu a bielu, resp. tmavú a svetlú. Ako ukázal neskorší výskum Eleanor Roschovej, ide skôr o rozdelenie na čiernu a studené farby (napr. modrá, zelená) a bielu a teplé farby (červená, oranžová, žltá) [23]. Roschová ukázala, že sa v tomto prípade ide o takzvané kompozitné kategórie, ktoré sú charakteristické viacerými kvalitatívne odlišnými prototypmi (najlepšími reprezentantmi). Napríklad pre kategóriu teplé farby, by sa najlepší reprezentanti zhodovali s našou bielou, žltou a červenou a prípadne aj oranžovou. Pokračujúc pri vysvetľovaní evolučného pridávania farebných termínov sa opäť stretávame s teóriou opozičných procesov. V ďalšom štádiu by mala podľa tejto hypotézy nasledovať červená, neskôr k nej opačná zelená, ďalej modrá alebo žltá a neskôr jej protipól. V predposlednom kroku, keď už teda jazyk obsahuje 6 základných opozičných farieb, prichádza na rad hnedá a v poslednom kroku už v ľubovoľnom poradí zvyšné štyri.

Empiricky boli tieto tvrdenia podložené výsledkami zo série farebných experimentov veľmi podobných tým zo svetovej farebnej štúdie opísaných nižšie. Napriek tomu, že na potvrdenie teórie experimenty v podstate stačili, boli v nich podstatné metodologické nedostatky [14]. Experimenty boli vykonané v 20 svetových jazykoch, počnúc angličtinou a inými európskymi jazykmi až po swahilčinu či mandarínčinu, avšak počet probandov pre jeden jazyk nebol väčší ako 3, čo sa vzhľadom na univerzálnosť prehlásení len ťažko berie za dostatočne širokú experimentálnu bázu. Ďalšou problematickou skutočnosťou bolo to, že experimenty sa konali len v rámci Berkeley, nie v prirodzených komunitách a to, že probandi boli väčšinou anglicky hovoriaci emigranti a niektorí z nich svoj materinský jazyk ani len dostatočne neovládali. Reakciou na tieto skutočnosti a nedostatky pôvodného experimentu bolo vytvorenie štúdie svetového rozsahu.

3.1 World Color Survey

Projekt World Color Survey alebo Svetová farebná štúdia bol odštartovaný v roku 1975 [4]. Jeho hlavným cieľom bolo vytvoriť veľkú bázu empirických dát a na jej základe

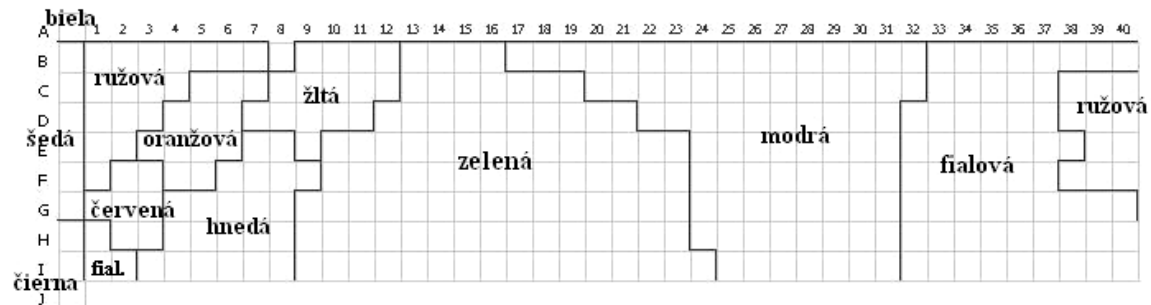
potvrdiť, vyvrátiť či modifikovať pôvodné hypotézy Berlina a Kaya. Na experimente sa zúčastnili probandi zo 110 jazykov bez písma a industrializovanej kultúry. Po ukončení experimentálnej fázy okolo roku 1980 nasledovalo spracovanie dát do elektronickej podoby, ich prekontrolovanie a prvotné analyzovanie. Finálna podoba databázy vo forme niekoľkých vzájomne logicky prepojených textových súborov bola sprístupnená na internete v roku 2003 [5].

Na experimente sa zúčastnilo v každom jazyku v priemere 24 probandov, mužov aj žien, prednostne monolingválnych. Pozostával z dvoch úloh. V prvej časti bolo probandom individuálne prezentovaných 330 farebných vzoriek vybraných z Munsellovho farebného priestoru, v 40 odtieňoch od R2.5 v prvom po RP10 v poslednom stĺpci so svetlosťou odstupňovanom v 8 riadkoch zhora nadol od najsvetlejšej po najtmavšiu farbu. Desaturované, bezfarebné odtiene boli reprezentované v nultom pravom stĺpci od bielej na vrchu, cez 8 stupňov šedej zodpovedajúcim svetlosti príslušného riadku až po čiernu úplne dolu. Nasledujúci obrázok zobrazuje schematické rozloženie Munsellových koordinátov všetkých farebných vzoriek. Pre lepšiu predstavu prikkladáme aj výsledky z farebného experimentu v slovenčine z [20], kde sa okrem iného nachádza farebný obrázok palety farebných vzoriek, či vizualizácie výsledkov experimentov z vybraných jazykov z WCS.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	18	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40			
A	0																																									9.5	
B	0	2	2	2	2	2	2	2	2	4	6	6	6	6	4	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	9.0
C	0	6	6	6	6	6	6	8	14	16	14	12	12	12	10	10	8	8	6	6	6	6	4	4	4	4	4	4	4	6	6	4	4	4	4	4	6	6	6	6	6	6	8.0
D	0	8	8	10	10	10	14	14	14	12	12	12	12	12	10	10	10	8	8	8	8	8	6	6	6	6	6	6	8	8	8	6	6	6	6	8	8	10	10	8	8	7.0	
E	0	12	12	12	14	16	12	12	12	10	10	10	10	10	10	10	12	12	10	10	10	10	8	8	8	8	8	8	8	10	10	10	8	8	8	8	10	10	10	10	12	12	6.0
F	0	14	14	14	16	14	12	10	10	8	8	8	8	8	8	10	12	12	10	10	10	10	8	8	8	8	8	8	10	12	12	10	10	10	10	10	12	12	14	14	5.0		
G	0	14	14	14	14	10	8	8	6	6	6	6	6	6	6	8	8	10	10	10	10	8	8	8	8	6	6	8	8	10	10	12	10	10	10	10	10	10	10	10	4.0		
H	0	10	10	12	10	8	6	6	4	4	4	4	4	4	4	6	6	8	8	10	8	6	6	6	6	6	6	8	10	12	10	10	10	10	10	10	10	10	3.0				
I	0	8	8	8	6	4	4	2	2	2	2	2	2	2	2	4	4	4	4	4	6	6	6	4	4	4	4	6	6	6	8	10	8	8	6	6	8	8	8	2.0			
J	0																																								1.5		
		2.5	5	7.5	10		5	10		5	10		5	10		5	10		5	10		5	10		5	10		5	10		5	10		5	10		5	10		5	10		
					R			YR			Y			GY			G			BG			B			BP			P			RP											

Obr. 2 Munsellova farebná mriežka

Schematické zobrazenie Munsellovej farebnej mriežky. Prvý stĺpec zľava a prvý riadok slúžia na označenie v rámci WCS experimentu. Posledný stĺpec na pravej strane zobrazuje Munsellove koordináty svetlosť (Value) a odtieň (Hue). Hodnoty tabuľky zodpovedajú Munsellovej Chrome, teda saturácii farieb. Všimnime si, že druhý stĺpec zľava obsahuje len nuly, ten predstavuje odtiene šedej.



Obr. 3 Výsledky farebného experimentu v Slovenčine

Obrázok ilustruje výsledky farebného experimentu v slovenčine. Oblasti vyznačené čiernymi čiarami zodpovedajú farbe vpísanej v strede. Táto vizualizácia vznikla na základe spracovania odpovedí 25 probandov zo Slovenska tým istým spôsobom, akým boli spracúvané údaje z WCS, ktorý je opísaný v časti 3.2., viac v [20].

Inštrukcie k prvej časti experimentu viedli probandov k tomu, aby používali základné farebné termíny, teda slová z „úzkej množiny jednoduchých slov, ktorými je možné pomenovať akúkoľvek farbu“, teda pomenovávať farebné vzorky tak, aby slovám, ktoré použili, rozumeli všetci hovorcovia ich jazyka (vlastnosti základných farebných termínov sme uviedli na konci predošlej časti). Farebné vzorky im boli prezentované v preddefinovanom náhodnom poradí rovnakom pre všetkých probandov. V druhej fáze im bola predstretá mriežka so všetkými 330 vzorkami (usporiadanými podľa odtieňa a svetlosti), na ktorej mali pre všetky použité termíny vybrať jedno alebo viac políčok, teda farebných vzoriek, ktoré boli podľa nich najlepšimi reprezentantmi danej kategórie.

Ako sa ukázalo vo výstupných dátach, v niektorých jazykoch pravdepodobne došlo k nepochopeniu inštrukcií u probandov. Je to jasne ukázať napríklad v prípade, že sa medzi výsledkami pomenovávacej úlohy vyskytlo okrem slova „hnedá“ vyskytli zároveň aj termíny ako „kávová“, „kapučínová“ a „latté“, ktoré ale boli použité len menšinou probandov. V našom farebnom experimente pre slovenský jazyk [20] sme pri použití takmer rovnakých postupov odhalili ďalšie metodologické a praktické nedostatky. Jedným z nich bolo napríklad to, že probandi mali tendenciu vytvoriť si vlastnú teóriu o základných farebných kategóriách a tej sa počas experimentu držať, čo potom znižovalo mieru spontánnosti a autenticity odpovedí. Taktiež sa ukázalo, že sada o 330 vzorkách je náročná na koncentráciu a že konzistentnosť odpovedí s pribúdajúcim počtom vzoriek klesá. Napriek všetkým metodologickým nedostatkom sa v experimente ukázalo, že aj v slovenčine je 11 základných farebných kategórií, ktoré korešpondovali s tými z pôvodnej štúdie Berlina a Kaya.

3.2 Analýza dát z WCS

Hlavným cieľom vzniku WCS a teda aj spracovania a analýzy jej výsledkov je potvrdiť alebo vyvrátiť tvrdenia Berlina a Kaya z 1969. V tejto časti čitateľovi poskytneme stručný prehľad významných štúdií v prospech týchto tvrdení. Hlavným cieľom týchto štúdií je, potvrdiť, že sa základné farebné termíny z jazykov WCS „podobajú“ na základné farebné termíny z angličtiny (alebo slovenčiny, vid'. vyššie). Toto porovnanie je možné urobiť práve na základe výsledkov farebných experimentov, ktoré poskytujú priamu súvislosť medzi farebnými hodnotami, ktoré si môžeme predstaviť aj ako body vo farebnom priestore a farebnými termínmi, ktorými ich probandi pomenovali. Jemnou modifikáciou pôvodných hypotéz je hľadanie paralel medzi nie tak s 11 termínmi z angličtiny ako so 6 základnými farbami z teórie opozičných procesov (biela, čierna, červená, zelená, žltá a modrá) a ich evolučne staršími kompozitnými kombináciami (napríklad „zelenomodrá“ alebo „studená“ a „teplá“). Cieľom je teda nájsť množinu univerzálnych farebných kategórií, z ktorých si každý jazyk „vyberie“ 2 až 11, ktoré vystihujú jeho základné farebné termíny a tiež zistiť, či existuje medzi jazykmi s rôznym počtom termínov určitá hierarchia, ktorá by naznačovala, že sa základné farebné termíny v jazykoch časom vyvíjajú (napríklad evolučne starší jazyk má spoločnú kategóriu pre modrú a zelenú a evolučne novší má zelenú a modrú zvlášť).

K predbežnému spracovaniu WCS dát došlo ešte pred ich zverejnením v roku 2003. Prvým, intuitívnym krokom v analýze týchto dát bolo nájdenie víťazných pomenovaní, teda skutočných základných farebných termínov. Ako sme uviedli vyššie, dáta obsahovali nielen pomenovania univerzálne, ale aj veľmi špecifické, tie sa však vyskytovali zriedka. *Víťazné pomenovanie* pre jednu farebnú vzorku v jednom jazyku je to slovo, ktoré bolo na označenie tejto vzorky probandami použité najčastejšie, podobne ako pri algoritme „víťaz berie všetko“. *Farebný lexikón jazyka* je potom množina termínov, z ktorých každý figuroval ako víťazný aspoň pre jednu z 330 farebných vzoriek. Ako sme uviedli v [20], rozdiel medzi počtom víťazných a vymenovaných termínov sa pre niektoré jazyky veľmi výrazne líšil, čo mohlo okrem iného poukázať na zlé pochopenie úlohy u probandov a tiež v neposlednom rade zhoršiť výsledky akejkolvek analýzy.

Prvým, predbežným spôsobom analýzy WCS dát bola ich vizualizácia do takzvaných máp termínov [4], ktoré boli vytvárané pomocou jednoduchých ASCII znakov do tvaru stimulačného materiálu, teda Munsellovej mriežky. Porovnaním s výsledkami z pôvodnej štúdie Berlina a Kaya bolo možné priamo sledovať paralely medzi preindustriálnymi WCS jazykmi a vyspelými jazykmi, napríklad angličtinou, pričom tieto sledovania boli priaznivo naklonené k pôvodným hypotézam. V [14] pristupovali autori k analýze výsledkov experimentov skôr teoretickým spôsobom. Výsledkom bol konceptuálny systém pre zakategorizovanie všetkých typov farebných lexikónov z WCS podľa toho, koľko základných farebných termínov obsahujú. Tento systém nadväzuje na pôvodnú teóriu o evolučných štádiách, pričom nové štádia reflektovali existujúce dáta z WCS. Autori tento systém popisujú na základe prípadových štúdií vybraných jazykov z WCS, bez celkového dôkazu o použiteľnosti systému pre všetky jazyky.

Na základe námietok voči takémuto intuitívnemu spracovaniu závislému na ľudskom faktore boli vykonané matematické analýzy všetkých WCS dát pomocou štatistických metód. Prvá a najznámejšia analýza bola [13], založená na skúmaní klasterizácie farebných kategórií naprieč jazykmi WCS a porovnaní s jazykmi z industrializovaných spoločností z pôvodnej štúdie. Na to, aby bolo možné merať klasterizáciu farebných termínov, bola zavedená jednotná reprezentácia pomocou geometrických centier farieb, ktoré boli pomenované daným termínom. Pri vytváraní centier sa najprv pre každý termín T z jazyka L pre každého hovorca, ktorý ho použil, vytvoril samostatný geometrický útvar v priestore $CIEL^*a*b^*$ a geometrické stredy týchto útvarov boli spriemernené do jedného bodu, reprezentácie termínu T . Pre každý termín bolo následne nájdené jemu najbližšie políčko z Munsellovej mriežky. Nakoniec bol teda každý farebný termín z každého jazyka reprezentovaný pomocou jednej z 330 farebných vzoriek, ktoré boli použité v experimente. Porovnanie miery klasterizácie farebných termínov z WCS a fiktívnych náhodných dát ukázalo, že farebné termíny z WCS sa podobajú (zhlukujú) do väčšej než náhodnej miery. Autori podobným spôsobom ukázali aj to, že centrá termínov z WCS sa vyskytujú v blízkosti centier pre angličtinu, čiže dokázali prvú časť univerzalistickej hypotézy a teda, že množina „použiteľných“ základných farebných kategórií je spoločná pre všetky jazyky.

Dôležitým aspektom debaty o univerzálnosti je to, či sa jedná o mechanizmus prototypový alebo iný, teda či sa farebné kategórie formujú okolo najlepších reprezentantov, ktoré vlastne predstavujú univerzálne základné farebné kategórie alebo ide o proces náhodný, pričom farebné kategórie sú určené len hranicami medzi nimi a prototypy sú len epifenoménom. Toto anti-univerzalistické tvrdenie pochádza z [22], kde autori vychádzajú z neúspešného pokusu o zopakovanie výsledkov Roschovej experimentov [23], v ktorých sa farby najlepších reprezentantov kategórií javili ako kognitívne privilegované (ľahšie zapamätateľné, identifikovateľné a pod.). Reakciou na tieto tvrdenia bola štúdia [21], v ktorej autori ukázali, že 6 základných opozičných farieb skutočne funguje ako univerzálna množina najlepších reprezentantov, že klasterizácia najlepších reprezentantov z WCS (získaných z druhej časti experimentu, viď vyššie) je ešte vyššia než u centier termínov, a že na ich základe je možné predpovedať hranice farebných kategórií v jazyku. Toto zistenie priaznivo súvisí aj s modelom farebnej kategorizácie založenom na prototypovej teórii popísanom v poslednej časti tejto kapitoly.

Ďalšia podrobná analýza WCS dát [16] reaguje na zovšeobecňujúci charakter dvoch uvedených štúdií, konkrétne na manipuláciu s vopred vypočítanými centrami alebo najlepšimi reprezentantmi, na základe ktorých mohlo dôjsť k skresleniu výsledkov. V tomto prípade sa autori zamerali na celú distribúciu kategoriálnych odpovedí na Munsellovej mriežke a to pre každého probanda zvlášť. Základnou jednotkou analýzy teda nebolo jedno políčko mriežky, ale binárny vektor reprezentujúci všetky políčka a reakcie probanda na ne vzhľadom na jeden termín, pričom z praktických dôvodov boli vynechané achromatické odtiene. Vektor jedného termínu u jedného probanda teda obsahoval pre každú z 320 zložiek 1, ak proband tento termín pre toto políčko použil, a 0 v opačnom prípade. Oblasť jednotiek vo vektore termínu teda zodpovedala mape farebných políčok pomenovaných u daného probanda týmto termínom. Tieto vektory boli spriemernené cez všetkých probandov a výsledná množina vektorov reprezentovala farebný lexikón daného jazyka. Podobne ako vo vyššie uvedených štúdiách bola na takto predspracovaných dátach vykonaná analýza klasterizácie termínov, ktorá ukázala, že všetky vymenované farebné termíny pre chromatické vzorky z celého WCS možno rozdeliť do 8 skupín identifikovateľných s kategóriami z angličtiny a to: červená, ružová, zelená, hnedá, žltá-alebo-oranžová a modrozelená. Čiže, bez ohľadu na to, koľko bolo v jazyku vymenovaných pomenovaní pre chromatické vzorky, bolo možné rozčleniť ich do 3 až 8 klastrov zhruba zodpovedajúcim univerzálnym základným kategóriám. Ak ich bolo 8, žltá, oranžová, modrá a zelená boli zvlášť, ak ich bolo menej, napríklad 3, spadali termíny skôr do kompozitných kategórií. Keď pridáme achromatické základné kategórie – bielu, čiernu a šedú, dostaneme množinu 11 základných farebných kategórií. Analýza vzájomnej zhody probandov na farebných termínoch v rámci jazyka ukázala, že k najväčšej zhode dochádza práve v miestach, v ktorých sa (zhruba) nachádza päť zo šiestich základných opozičných farieb (okrem modrej, ktorá sa väčšinou vyskytuje ako časť kompozičnej modrozelenej).

V najnovšom z uvedených článkov [17] ten istý tím autorov poukazuje aj na hypotézu o evolučnom vývoji tým, že nachádza takzvané motívy, systémy farebných

kategórií, ktorých je obmedzené množstvo (3-6) a platia univerzálne pre všetky jazyky z WCS. Konkrétne sa v každom z jazykov objavuje jeden alebo aj viac týchto motívov, čo znamená, že univerzálne pravidlá môžu platiť silnejšie pre všetky jazyky ako v rámci jedného jazyka. Dôležitým aspektom ostáva pôvod týchto univerzálnych vzorov a mechanizmus, na základe ktorého k tomuto javu dochádza.

3.3 Univerzálnosť farebných kategórií

Jednou z odpovedí na otázku vzniku univerzálnych pravidiel vo vytváraní farebných kategórií je zdôvodnenie evolučné. Podľa [34] sú farby najlepších reprezentantov kategórií univerzálne kvôli tomu, že sa často vyskytujú v životnom prostredí a preto je na ne náš perceptuálny systém určitým spôsobom naladený. Podobne môže ísť o evolučné naladenie na vlastnosti najbežnejšieho denného osvetlenia [26].

V [11] autori zas tvrdia, že vznik a univerzálnosť základných farieb (červenej, zelenej, modrej, žltej a fialovej) sa úzko viaže na tvar ideálneho perceptuálneho farebného priestoru (viď vyššie), konkrétne Munsellovho farebného priestoru. Ako vidno na obrázku 1 v časti 2.5, jeho tvar nie je úplne pravidelný. Práve v oblastiach, ktoré sú buď to vypuklé alebo znížené, sa nachádzajú najlepší reprezentanti pre základné farby. Ďalej táto štúdia tvrdí, že pomenovávanie častí farebného priestoru sa musí uskutočňovať tak, aby maximalizovalo informačnú hodnotu farebných termínov. A teda, že prirodzené, prvotné rozdelenie priestoru a jeho pomenovanie je vždy tmavá/studená a svetlá/teplá, ktoré sa nachádzajú zhruba na opačných stranách farebného priestoru. Najvzdialenejšou od týchto „lokálí“ farebného priestoru je oblasť predstavujúca odtiene červenej, ktorá by mala podľa tejto teórie a súhlasne aj podľa Berlina a Kaya byť pridaná ako tretia základná farba. Predikcia toho, ktorá bude ďalšia základná farba, sa v tomto prípade sťažuje, pretože vzdialenosť medzi oblasťami klesá. Predpokladá sa, že by to mohla byť žltá alebo modrá³, ďalej zelená, fialová, ružová, oranžová, hnedá a šedá.

Okrem fyziologického aspektu ľudského percepčného aparátu treba prihliadať aj na sociálny rozmer, konkrétne na verbálnu komunikáciu medzi hovorcami jazyka. Ten bol skúmaný pomocou multiagentovej simulácie [1, 27]. Agenty sú v tomto výpočtovom modeli vybavené percepciou v CIEL*a*b* priestore, pričom vnemy kategorizujú pomocou interných reprezentácií farieb. V [1] je každá kategória reprezentovaná ako jeden bod vo farebnom priestore a príslušnosť do kategórie je funkciou vzdialenosti perceptu od prototypu kategórie.⁴ V [27] sú kategórie reprezentované zložitejším spôsobom, pomocou RBF (radial basis function) neurónov pospájaných do takzvaných adaptívnych sietí.⁵ Agenty poznajú dva druhy akcií, hru na rozlišovanie a hru na hádanie, pričom prvá sa týka odlišovania rôznych farebných objektov (vlastne vzoriek) od seba

³ Čo už nie je v súlade s pôvodnou hypotézou založenou na opozičných procesoch, pretože ako opozičná by mala prísť zelená.

⁴ Veľmi podobný prototypový prístup popíšeme v ďalšej sekcii, preto ho tu načrtujeme len stručne.

⁵ Adaptívna sieť je dopredná neurónová sieť z RBF neurónov. Tie samotné sa však neučia, menia sa len ich váhy smerom do výstupného neurónu. Jednotlivé RBF uzly môžu pribúdať a odbúdať na základe zaznamenávanej úspešnosti v hrách.

a prebieha u každého agenta zvlášť a druhá naopak vyžaduje interakciu medzi dvoma agentmi. Hru na hádanie hrajú vždy dva náhodne vybrané agenty z populácie vo vopred stanovených rolách hovorca a poslucháča a jej cieľom je doplnenie chýbajúcich interných farebných kategórií u oboch agentov a zosúladenie farebných lexikónov, ktoré tieto farebné kategórie pomenúvajú a reprezentujú verejne.⁶ Tieto simulácie boli spustené s dvojakými sadami farebných vzoriek, prírodnými (z farebných fotografií) a náhodnými (počítačovými) farbami, pričom výsledky boli spracované rovnakým spôsobom ako údaje z WCS v [13] a porovnané s týmito výsledkami. Zaujímavý výsledok bol, že systém farebných kategórií, ktorý si agenty vytvorili, bol kvalitatívne podobný základným farebným kategóriám z WCS a teda aj v umelom prostredí s použitím vhodnej reprezentácie farieb (perceptuálneho farebného priestoru) je možné nasimulovať vznik farebných kategórií pochádzajúcich z nášho univerzálneho repertoára.

4 Simulácia kategorizácie farieb

Náš model kategorizácie farieb je založený na Roschovej zisteniach o prototypových javoch. Napriek tomu, že Roschová svoju teóriu považuje za popisnú skôr než vysvetľujúcu, rozhodli sme sa použiť tieto princípy ako inšpiráciu pri vytváraní mechanizmu tvorby interných reprezentácií kategórií, v našom prípade farieb. V tomto modeli je každá kategória reprezentovaná práve jedným prototypom a členstvo prvkov v nej sa odvíja od ich vzdialenosti od prototypu, pričom prototyp aj skúmané príklady musia byť reprezentované v rovnakom priestore s použiteľnou metrikou.

V našej simulácii sme sa rozhodli vytvoriť idealizovaného umelého hovorca do každého z jazykov z WCS. Ten sa má učiť farby „ostenzívnym“ spôsobom na základe všetkých odpovedí všetkých probandov z daného jazyka, akoby mu každý povedal, ako pomenúva ktorú farbu. Pre vnútornú implementáciu farebných kategórií tohto simulovaného hovorca sme sa rozhodli použiť sémantiku rozlišovacích kritérií.

4.1 Rozlišovacie kritéria

Sémantiku rozlišovacích kritérií pôvodne navrhol Šefránek [28] a implementoval Takáč [29,30]. Inšpirované Roschovej zisteniami o prototypových javoch, rozlišovacie kritéria fungujú ako *lokálne reagujúce detektory*. Každé rozlišovacie kritérium reprezentuje jednu kategóriu, teda je schopné rozhodnúť, do akej miery je jemu prezentovaný vstup členom kategórie, ktorú predstavuje. Lokálne reagujúci detektor si môžeme predstaviť ako dvojicu, prototyp kategórie reprezentovaný bodom vo vstupnom priestore kritéria a aktivačnú funkciu kritéria, ktorá na výstupe vracia číslo z intervalu $\langle 0,1 \rangle$, reakciu na vzdialenosť vstupu od prototypu kritéria. Dôležitou vlastnosťou rozlišovacích kritérií je adaptívnosť – prototyp, rovnako ako aj parametre metriky, na ktorej je založená

⁶ Všimnite si, že rovnako ako u ľudí je možné, že je nejaká farebná kategória reprezentovaná u rôznych jedincov rôzne, ale dostatočne blízko (v tomto prípade môžeme skutočne hovoriť o blízkosti, keďže ide o body trojrozmerného priestoru) na to, aby si jedinci porozumeli, teda pomenovali rovnaké alebo podobné percepty rovnakým termínom.

aktivačná funkcia, sa priebežne počítajú z príkladov tak, aby odrážali štatistické charakteristiky učiacej vzorky. Vstupný priestor nemusí byť nutne euklidovský, ako je tomu v prípade farieb reprezentovaných vo väčšine farebných priestorov.

Lokálne reagujúce detektory majú intuitívnu geometrickú interpretáciu založenú na konceptuálnych priestoroch [7]. Konceptuálny priestor je geometrický priestor s dimenziami zodpovedajúcimi atribútom reprezentovaných entít. V našom prípade, kde vstupmi pre kategorizáciu budú farby reprezentované ako body vo farebnom priestore, sa jedná o 3 rozmery jedného priestoru s jasne definovanou metrikou, preto sa ďalej nebudeme venovať problému počítania vzdialeností v ľubovoľnom konceptuálnom priestore, viac v [30].

Pre nás dôležitou vlastnosťou prirodzených kategórií [7] a tiež rozlišovacích kritérií je predpoklad konvexnosti: ak dva body reprezentujú objekty, ktoré sú dobrým príkladom nejakej kategórie, aj všetky body ležiace medzi nimi by mali byť dobrým príkladom tejto kategórie. Meraním vzdialenosti vstupu od prototypu, ktorý sa nachádza v centre kategórie získame jeho „mieru príslušnosti“ do tejto kategórie: čím je vzdialenosť nižšia, tým je hodnota aktivačnej funkcie bližšie k 1, a vstup je lepším reprezentantom kategórie. Táto reprezentácia umožňuje, aby mali kategórie neostré (fuzzy) hranice, tak ako tomu je aj u kategórií v reálnom svete.

V implementácii rozlišovacích kritérií, ktorú sme použili, získava každé kritérium svoj prototyp na základe jemu prezentovaných vstupov (dostáva len pozitívne príklady), konkrétne ako ich geometrické centrum, v našom prípade priemer ich súradníc. Lokálne reagujúci detektor $r_{\bar{p}}$ (kde \bar{p} je prototyp kategórie) vráti aktiváciu exponenciálne klesajúcu s vzdialenosťou od prototypu

$$r_{\bar{p}}(x) = \exp(-k \cdot d(\bar{p}, \bar{x})), \quad (1)$$

kde k je kladná konštanta, $d(\bar{p}, \bar{x})$ je použitá metrika a \bar{x} je trojrozmerný vektor vo farebnom priestore CIEL*a*b*. Rozlišovacie kritéria, ktoré sme použili zaznamenávajú distribúciu vstupov v kovariančnej matici Σ a pre výpočet aktivácie používajú Mahalanobisovu metriku

$$d_{\Sigma^{-1}}^2(\bar{p}, \bar{x}) = (\bar{x} - \bar{p})^T \Sigma^{-1} (\bar{x} - \bar{p}), \quad (2)$$

kde \bar{p} a \bar{x} sú stĺpcové vektory a Σ^{-1} je inverzná matica ku kovariančnej matici Σ množiny vstupov, ktoré kritérium dostalo počas tréningu. Pre bližší popis tohto mechanizmu viď [30].

4.2 Implementácia a metódy vyhodnotenia simulácie

Simuláciu sme implementovali v jazyku Java s použitím knižníc pre kovariančné rozlišovacie kritéria a súvisiacich matematických knižníc z [29]. Prvým krokom nutným pre prácu z WCS dátami bolo spracovanie databázy vo forme textových súborov stiahnutých zo stránky WCS [5], ktoré boli vzájomne prepojené pomocou skratiek a poradových čísel. Z nej sme vytvorili tréningové sady pre rozlišovacie kritéria v našej simulácii.

Pre každý jazyk sme vytvorili sadu rozlišovacích kritérií zodpovedajúcich všetkým farebným termínom, ktoré použili probandi z daného jazyka. Rozlišovacie kritéria predstavovali sadu interných reprezentácií umelého hovorca. Počas tréovania dostávali kritéria ako vstup trojrozmerné vektory vo farebnom priestore CIEL*a*b*, ktoré zodpovedali farebným vzorkám, políčkam farebnej mriežky z pôvodného experimentu. Použili sme všetky odpovede všetkých probandov jedného jazyka⁷, ktoré sme postupne predkladali príslušným rozlišovacím kritériám. Ak teda proband p pomenoval políčko c termínom t , rozlišovacie kritérium zodpovedajúce tomuto termínu aktualizovalo svoj prototyp na základe farebných koordinát políčka c .

Po natréovaní všetkých rozlišovacích kritérií pre všetky jazyky sme porovnali výsledky simulácie so štatisticky vyhodnotenými pôvodnými dátami, a to na základe víťazných kategórií⁸, vektorov aktivít a celkovo na základe klasterizácie kategórií naprieč všetkými jazykmi.

Ako sme spomenuli v predošlej časti, pre každé jedno z 330 políčok mriežky môžeme z dát pre celý jazyk vyjadriť jeho *víťaznú kategóriu* vo forme poradového čísla termínu, ktorý na jeho pomenovanie použilo najväčšie množstvo probandov, akoby sme použili algoritmus „víťaz berie všetko“. Takýmto spôsobom sme vypočítali pre každý jazyk víťazné kategórie pre všetky farebné vzorky. Okrem porovnania s víťaznými kategóriami z rozlišovacích kritérií sme pri tom prišli na závažnú skutočnosť, že počet vymenovaných kategórií a reálnych víťazných kategórií sa u väčšiny jazykov líši. V priemere je víťazných termínov cca o 13 menej ako vymenovaných, pričom maximum z tohto rozdielu bolo až 71, avšak modus bol 3, čiže môžeme povedať, že sa v rámci dát vyskytujú viac a menej „zašumené“ jazyky. Takéto rozdiely mohli vzniknúť napríklad v prípade, že probandi jednoducho nepochopili úlohu a používali vlastné subjektívne termíny (napríklad problém s hnedou a kávovou, ktorý sme spomínali v 3.2).

Jazyky sa tiež líšili v tom, do akej miery sa vedeli probandi zhodnúť na pomenovávaní konkrétnych farebných vzoriek. Pre každý jazyk sme vyjadrili percento vzájomnej zhody probandov ako pomer počtu probandov, ktorý pre danú vzorku použili víťazný termín k tým, čo použili nejaký iný a tieto pomery sme spriemernili cez všetkých 330 vzoriek. Najväčšia zhoda probandov bola zhruba 89%, najmenšia okolo 42%, priemer zo všetkých jazykov bol 67% a modus 60%.

Víťazné kategórie pre simuláciu sme počítali na základe hodnôt aktivácie rozlišovacích kritérií daného jazyka, pričom ako vstup slúžili farebné hodnoty skúmanej farebnej vzorky (políčka). Keďže sme pri vyhodnocovaní výsledkov simulácie v [20] zistili, že existujú niektoré zavádzajúce prípady bezvýznamných úzko vyprofilovaných

⁷ Pri priemernom počte 25 probandov na jeden jazyk a 330 políčkach to vychádza okolo 8250 vstupných hodnôt, ktoré boli podľa reakcií probandov rozdistribuované medzi všetky možné farebné kategórie v jazyku.

⁸ V nasledujúcom texte budeme pre jednoduchosť voľne zamieňať koncepty „farebný termín“ a „farebná kategória“. Vychádzame z predpokladu, že základné farebné termíny pomenúvajú základné farebné kategórie a keďže nás viac zaujíma univerzálnosť farebných kategórií než konkrétne slová, ktoré ich v konkrétnych jazykoch pomenúvajú, nebudeme sa nimi zaoberať.

kategórií⁹, rozhodli sme sa, že budeme aktivitu rozlišovacích kritérií pri vyhodnocovaní víťazných kategórií násobiť počtom probandov, ktorí pre danú vzorku použili reprezentované pomenovanie. Pre vzorku c je v jazyku l víťaznou kategóriou tá, ktorej rozlišovacie kritérium $r_{\bar{p}}$ dáva po vynásobení aktivácie pre vstup c počtom probandov, ktorí toto pomenovanie použili N , najväčšiu hodnotu $r_{\bar{p}}(c) \cdot N$ spomedzi všetkých ostatných kritérií.

Reflektujúc námietku, že víťazné kategórie sú generalizáciou odpovedí všetkých probandov, sme sa podobne ako [16] rozhodli zaviesť porovnanie na základe distribúcie odpovedí probandov a aktivácií rozlišovacích kritérií, ktoré sme nazvali *vektory aktivít kategórií*. Podobne ako pri víťazných kategóriách sme v každom jazyku pre každú vzorku vytvorili vektor aktivít zo všetkých dostupných farebných kategórií – vymenovaných farebných termínov tak, že sme zráтали odpovede probandov podľa toho, aké termíny použili, pričom jeden komponent vektora bol rovný jednej farebnej kategórii (kategórie boli zoradené vždy v rovnakom poradí). Majme napríklad jazyk X s 10 probandmi a troma farebnými termínmi $t1, t2$ a $t3$, ak pre dané políčko c odpovedali dvaja termínom $t1$, traja termínom $t2$ a piati termínom $t3$, potom aktivačný vektor \bar{a}_c bude vektor $[2, 3, 5]$. V prípade výsledkov simulácie sme opäť zobrali aktivity všetkých kritérií vynásobené zodpovedajúcim počtom probandov a vytvorili vektor.

V ďalšom kroku sme dva vektory aktivít, jeden z dát a jeden zo simulácie, znormovali použitím Euklidovskej normy¹⁰ a vypočítali sme ich skalárny súčin, teda kosínus uhla, ktorý tieto vektory zvierajú. Ak je skalárny súčin rovný 1, vektory sa rovnajú, ak -1 sú si navzájom opačné. Naším predpokladom bolo, že sa tieto hodnoty budú blížiť k jednej.

Posledný spôsob porovnania sme vybrali z [13]. Použili sme ten istý postup, ako sme popísali v časti 3.2. Pre každú kategóriu každého jazyka sme vypočítali jej centrum ako bod v CIEL*a*b* priestore. Mieru klasterizácie sme vyjadrili pomocou miery disperzie týchto kategórií nasledujúcim spôsobom. Pre každú kategóriu x v jazyku l sme našli kategóriu x^* v inom jazyku l^* , ktorá k nej bola spomedzi všetkých ostatných kategórií všetkých ostatných jazykov euklidovsky najbližšie. Mieru disperzie kategórií sme určili tak, že sme pre každý jazyk vypočítali sumu vzdialeností medzi jeho kategóriami a im najbližšími kategóriami z ostatných jazykov a tieto sumy navzájom sčítali.

$$D = \sum_{l, l^* \in WCS} \sum_{x \in l, x^* \in l^*} \min vzd(x, x^*). \quad (3)$$

⁹ K takejto situácii mohlo dôjsť v prípade, že sa kategória vyskytla iba u jedného alebo zopár probandov. Vzhľadom na to, že si kritériá formovali svoje prototypy priemerovaním prezentovaných vzoriek, toto konkrétne kritérium, trénované na malom množstve farebných vzoriek, dávalo podstatne väčšiu odozvu pre konkrétne vstupy a teda mohlo „prebiť“ kritérium reprezentujúce kategóriu, ktorá bola použitá podstatným množstvom probandov, ale jej prototyp bol viac všeobecný.

¹⁰ Každý komponent vektora sme vydělili veľkosťou vektora, teda odmocninou zo sumy štvorcov jeho komponentov. Takto sme dostali dva jednotkové vektory v n -rozmernej hyperguli, kde n je počet kategórií vo vyhodnocovanom jazyku.

Vychádzajúc z overenej skutočnosti [13], že farebné kategórie v jazykoch z WCS majú disperziu menšiu než náhodné dáta, rozhodli sme sa porovnať disperziu vypočítanú z WCS dát s disperziou kategórií z našej simulácie. Tú sme vypočítali vyššie uvedeným spôsobom s tým, že centrá kategórií sme nepočítali z odpovedí probandov, ale použili sme prototypy z rozlišovacích kritérií, ktoré ich predstavovali.

4.3 Výsledky

Výsledok porovnania víťazných kategórií reprezentuje percento zhody medzi originálnymi dátami a rozlišovacími kritériami. Táto zhoda bola v priemere 90%, pričom maximálna zhoda bola 98% a minimálna 54,5%, modus bol 91,5% a medián 91,5%.

Čo sa týka porovnania vektorov aktivít kategórií z dát a rozlišovacích kritérií, ich skalárny súčin bol v priemere 0,97, najväčšia hodnota bola 0,99 a najmenšia 0,79, modus 0,97 a medián 0,97. Ideálny prípad úplnej zhody by nastal, ak by skalárny súčin týchto vektorov bol 1, čo znamená, že uhol medzi nimi by bol nulový. Z vysokých hodnôt priemeru, najčastejšej a strednej hodnoty môžeme usúdiť, že rozlišovacie kritéria boli väčšinou veľmi úspešné a len v niektorých prípadoch menej úspešné (u zhruba tretiny jazykov bola zhoda menšia než priemer).

Posledný aspekt, ktorý sme skúmali, bola disperzia farebných kategórií. Tá bola v prípade rozlišovacích kritérií výrazne (cca 3-krát) menšia než vypočítaná z originálnych dát, čo znamená, že centrá kategórií z rozlišovacích kritérií mali značne väčšiu mieru klasterizácie než reálne dáta. Tento výsledok poukazuje na to, že rozlišovacie kritéria sú schopné úspešne generalizovať tréningové dáta. Ak by to tak nebolo, miera disperzie by sa blížila k tej vypočítanej z pôvodných dát. Podstatný rozdiel medzi hodnotami disperzie u simulácie a reálnych dátach vyplýva aj zo „zašumenosti“ výsledkov experimentov. Ako sme uviedli vyššie, počet vymenovaných a víťazných termínov sa v niektorých prípadoch výrazne líšil, podobne aj zhoda probandov na víťazných termínoch kolísala medzi polovicou a zhruba 90%. Vzhľadom na to, že disperzia sa počítala pre všetky vymenované termíny všetkých jazykov, mohli tieto bezvýznamné kategórie výsledok značne skresliť.

5 Záver

Popísali sme fungovanie perzeptuálnej a lexikálnej kategorizácie farieb. Dôležitým fenoménom v tejto oblasti je existencia párov základných opozičných farieb. Sú to biela – čierna, červená – zelená a žltá – modrá. Tie nikdy nie je možné vnímať súčasne. Môžu za to opozičné princípy vyskytujúce sa na rôznych úrovniach spracovania vizuálneho vnemu, od receptorov až po neurálne dráhy v primárnej vizuálnej kôre. Týchto šesť základných farieb figuruje aj v jadre teórie o základných farebných termínoch (kategóriách).

Prostredníctvom štatistického spracovania dát zozbieraných v rámci svetovej farebnej štúdie (WCS), obsahujúcej 110 jazykov neindustrializovaných kultúr bez písma, sa dokázalo, že v lexikálnej farebnej kategorizácii existujú univerzálne princípy. Konkrétne, že farebný lexikón ľubovoľného jazyka obsahuje najviac 11 základných

farebných termínov, ktorým zodpovedajú farebné kategórie. Tie pochádzajú z univerzálnej množiny farebných kategórií zodpovedajúcich našej bielej, čiernej, červenej, zelenej, žltej, modrej, hnedej, šedej, oranžovej, ružovej a fialovej. Dôraz sa kladie na šesť opozičných farieb, ktoré sú považované za evolučnej staršie.

Univerzálne farebné kategórie sú oblasti, do ktorých sa zhľukujú (klasterizujú) najlepšie reprezentanty farebných termínov všetkých jazykov. Predpokladá sa, že univerzálnosť farebných kategórií pramení z farebnej kompozície životného prostredia a bežného denného osvetlenia, ideálneho funkčného rozdelenia perceptuálneho farebného priestoru a sociálnej interakcie.

V našej simulácii farebnej kategorizácie sme použili prototypový prístup k modelovaniu kategórií. Pre každý jazyk z WCS sme simulovali idealizovaného umelého hovorca, ktorý si osvojoval farebné termíny v danom jazyku. Pre internú reprezentáciu týchto termínov a im zodpovedajúcich farebných kategórií sme použili sémantiku rozlišovacích kritérií, ktoré reagujú na prezentované vstupy vyhodnocovaním vzdialenosti medzi vstupom a prototypom kategórie. Takto určujú do akej miery vstup patrí do tejto kategórie. Rozlišovacie kritérium, ktoré dáva pre daný vstup najlepšiu odozvu spomedzi ostatných kritérií, reprezentuje termín, ktorým by náš agent pomenoval prezentovaný vstup (farebnú vzorku). Výsledky simulácie ukázali, že prototypový model kategorizácie založený na sémantike rozlišovacích kritérií je vhodný pre problematiku pomenovávania farieb a farebných kategórií.

Pod'akovanie: Táto práca bola podporená grantom VEGA 1/0361/08.

Literatúra

- [1] Belpaeme, T., Bleys, J.: Colourful language and colour categories, Second International Symposium on the Emergence and Evolution of Linguistic Communication, 2005.
- [2] Berlin, B., Kay, P.: *Basic Color Terms: Their Universality and Evolution*. University of California Press, Berkeley, CA, 1969.
- [3] Conway, B.R. Spatial structure of cone inputs to color cells in alert macaque primary visual cortex (V-1). *Journal of Neuroscience*, **21** (2001), pp. 2768-2783.
- [4] Cook, R. S., Kay, P., Regier T.: The World Color Survey database: History and use. In Cohen, H. Lefebvre, C.: *Handbook of Categorization in Cognitive Science*, Elsevier, St. Louis, 2005, pp. 223-242.
- [5] Cook, R. S., Kay, P., Regier T.: *WCS data archives*. 2003 (posledná zmena 14.11.2006). <<http://www.icsi.berkeley.edu/wcs/data.html>>
- [6] Fairchild, M.D.: *Color Appearance Models, 2nd Ed.* Wiley-IS&T, Chichester, UK. 2005.
- [7] Gärdenfors, P.: *Conceptual spaces*. MIT Press, Cambridge, MA, 2000.

- [8] Gouras, P.: Color Perception. In *WebVision, The organization of the Retina and Visual System*, John Moran Eye Center, University of Utah. 2008. <<http://webvision.med.utah.edu/KallColor.html>>
- [9] Green, M.: *SBFAQ Part 1: Basic Terms and Definitions*. Visual Experts. 2004. <<http://www.visualexpert.com/FAQ/Part1/cfaqPart1.html>>
- [10] ID-Studiolab. 2004. <<http://studiolab.io.tudelft.nl/vormtheorie1/boulevard/onnoscolourshow/pics.html>>
- [11] Jameson K.A., D'Andrade R.G.: It's not really Red, Green, Yellow, Blue: An inquiry into perceptual color space. In Hardin, C.L. and Maffi, L., *Color Categories in Thought and Language*, MIT Press, Cambridge, MA, 1997, p. 295–319.
- [12] Kay, P., Berlin, B., Maffi L., Merrifield, W.: Color naming across languages. In Hardin, C.L., Maffi, L., *Color Categories in Thought and Language*, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1997, pp 21–58.
- [13] Kay, P., Regier, T.: Language, thought and color: recent developments. *TRENDS in Cognitive Sciences*, **10** (2006), pp. 51-54.
- [14] Kay, P., Regier, T.: Resolving the question of color naming universals, *Proceedings of the National Academy of Sciences* **100** (2003), pp. 9085-9089
- [15] Lakoff, G.: *Women, Fire and Dangerous Things*, The University of Chicago Press, Chicago, 1987.
- [16] Lindsey D. T., Brown, A. M.: Universality of color names. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **103** (2006), pp. 16608-16613.
- [17] Lindsey D. T., Brown, A. M.: World Color Survey color naming reveals universal motifs and their within-language diversity. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **106** (2009), pp. 19785-19790.
- [18] Ľudské Telo, GEMINI, spol. s r. o., Bratislava 1991. (The Human Body, Marshall Editions Ltd., London 1989)
- [19] Pridmore, R. Color variability of wine in a glass and general comments on contrast effects. *Color Research and Application*. **30** (2005), pp. 146-149.
- [20] Rebrová, K.: *Basic Color Categories*, diplomová práca, Univerzita Komenského v Bratislave, 2009.
- [21] Regier T., Kay P., Cook R. S.: Universal foci and varying boundaries in linguistic color categories. In Bara, B. G., Barsalou L., Bucciarelli, M., *Proceedings of the 27th Annual Conference of the Cognitive Science Society*, 2005.
- [22] Roberson, D., Davies I. & Davidoff, J.: Colour categories are not universal: Replications and new evidence from a Stone-age culture. *Journal of Experimental Psychology*, **129** (2000), pp. 369-398.
- [23] Rosch, E. Universals in color naming and memory. *Journal of Experimental Psychology*. **93** (1972), pp. 10-20.
- [24] Rosch, E.: Principles of Categorization, in Rosch E., Lloyd B., *Cognition and Categorization*, Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale NJ, 1978, pp. 27-48.

- [25] Sharpe, L.T.; Stockman A, Jägle H, Nathans J. Opsin genes, cone photopigments, color vision and color blindness. In Gegenfurtner K.R., Sharpe L.T. *Color Vision: From Genes to Perception*. Cambridge University Press, Cambridge, 1999. pp. 3-51.
- [26] Shepard, R.N.: The perceptual organization of colors. In Barkow, J. et al., *The Adapted Mind*, Oxford University Press, Oxford, 1992, pp. 495–532.
- [27] Steels, L., Belpaeme, T.: Coordinating Perceptually Grounded Categories through Language. A Case Study for Colour, *Behavioral and Brain Sciences* **28** (2005), pp. 469-489.
- [28] Šefránek, J.: Kognícia bez mentálnych procesov. In Beňušková, L. et al.: *Kognitívne vedy*, Kaligram, Bratislava, 2002, pp. 200-256.
- [29] Takáč, M.: Autonomous Construction of Ecologically and Socially Relevant Semantics. *Cognitive Systems Research* **9** (2008), pp. 293-311.
- [30] Takáč, M.: Kognitívna sémantika komplexných kategórií založená na rozlišovacích kritériách. In: Kvasnička et. al, *Mysel, inteligencia a život*. Vydavateľstvo STU, Bratislava, 2007, pp. 339 - 355.
- [31] Tanaka, K.: Inferotemporal Cortex and Object Vision. *Annual Review of Neuroscience*, **19** (1994), pp. 109-139.
- [32] Wilson R. A., Keil F. C. (Eds.): *MIT Encyclopedia of Cognitive Sciences*. MIT Press, Cambridge, MA, 1999.
- [33] Wittgenstein, L. *Philosophical Investigations*. Macmillan, New York, 1953.
- [34] Yendrikhovskij, S.N.: Computing color categories from statistics of natural images. *Journal of Imaging Science and Technology* **45** (2001), pp. 409–417