Použití spektrálních dat a výpočetních metod pro stanovení barvy

I. Teoretické základy barevného vnímání

RNDr. ALEXANDER BARTKO, Výzkumný ústav pivovarský a sladařský, Brno

RNDr. JIŘÍ GOTVALD, Výzkumný ústav vlnařský, Brno

Klíčová slova: Barva, spektrální a psychofyzikální popis, kvantifikace, barevná diference

ÚVOD

Stanovení barvy sladiny a piva patří mezi jedno ze základních kritérií senzorického hodnocení kvality těchto produktů. K prvním pokusům o objektivizaci měření barvy patří použití komparátorů a barevných škál [Brand, Lintner, Hellige]. Se zavedením fotometrů do běžného vybavení pivovarských a sladařských laboratorí se pochopitelně objevily snahy o měření barvy pomocí těchto přístrojů. Hodnota barvy se však vypočítává z měření absorpance při jedné (EBC, ČSN) nebo nejvýš dvou vlnových délkách (ASBC). Jak málo společného má takto stanovená barva se způsobem vnímání barvy lidským okem (a ten zde považujeme za rozhodující), vyplne z následujícího textu.

Snahy o vytvoření jednotného a v praxi použitelného systému uspořádání barev jsou známy již relativně dlouhou dobu, avšak úspěšně byl takový systém realizován až v r. 1611 švédským mnichem a astrologem Sigridem Aronem Forsiem. Úspěšný byl tento systém proto, že — jako první — umožnil nezávislé odstupňování tří základních koloristických veličin, jasu, tónu a sytosti. Od té doby byla vyvinuta řada systémů třídění barevných odstínů, z nichž mezi nejznámější patří systém Munsellův [1, 2, 3, 4]. Tento systém je založen na centrální vertikální ose jasu, podél níž je vějířovitě umístěno 40 tzv. map barevných odstínů. Každá mapa vějíře obsahuje barevné odstíny stejného barevného tónu, avšak měnícího se jasu a sytosti podle dvou na sebe kolmých os; celkově tak Munsellův atlas obsahuje 960 barev. Munsellova notace umožňuje popis libovolného barevného

odstínu následujícím způsobem: barevný tón se označuje jako počáteční písmeno anglického označení jednoho z pěti základních tónů (červeného, žlutého, zeleného, modrého, fialového) nebo jejich kombinace (YG — žlutozelená) s číselným odstupňováním, následuje vyjádření jasu a sytosti v desetičlenné stupnici. Označení 5 YR 6/8 tedy znamená oranž tónu 5, jasu 6 a sytosti 8. Uvedené veličiny je možno stanovit vizuálně porovnáním s Munsellovým atlasem barev, který byl poprvé vydán v r. 1915, a využít tak výhody standardizace, resp. unifikace označování a popisu barev. Mezi další často používané nebo historicky významné systémy třídění barev patří např. Ostwaldův nebo DIN systém [5]. Jejich využití přináší nejen již zmíněnou standardizaci popisu barevných odstínů, ale též možnost poměrování jednoho odstínu vůči druhému pomocí uvedených tří koloristických veličin, tedy např. pomocí výrazů modřejší, jasnější, sytější apod. Tato skutečnost přináší velké výhody při popisu a hodnocení barevných objektů v průmyslové praxi.

1. SPEKTRÁLNÍ A PSYCHOFYZIKÁLNÍ POPIS BARVY

V řadě odvětví se vyjadřuje barevnost objektů pomocí jejich spektrálních charakteristik, v případě čirých materiálů charakteristikami spektrální propustnosti či odvozenými, pro turbidní materiály nejčastěji charakteristikami spektrální odrazivosti; mluvíme tak o absorpční, resp. emisní spektrofotometrii. Hodnoty spektrálních charakteristik je třeba snímat zpravidla pro celou oblast viditelného spektra, tj. asi od 380 do 770 nm;

v řadě případů vyhoví užší spektrální oblast, neboť na okrajích viditelné části spektra je citlivost lidského oka nízká a tyto oblasti jen nepatrně přispívají k celkovému barevnému vjemu. Pro úplnost je třeba dodat, že řada spektrofotometrů, zvláště remisních, neposkytuje souvislou spektrální křivku, ale jednotlivé spektrální hodnoty v diskrétních bodech spektra. Toto a skutečnost, že spektrální hodnoty bývají převáděny na dále popsané koloristické veličiny numerickými postupy na digitálních počítačích, způsobuje, že v rovnicích 1a-c, resp. 2a-c je integrace nahrazena sumací.

Uvedená absorpční či remisní spektra bývají vypisována na připojeném souřadnicovém zapisovači ve formě spojitě křivky nebo v digitalizované formě zobrazována na displeji přístroje, popř. tištěna na tiskárně apod. V případě následného výpočetního zpracování spekter bývá obvyklé jejich ukládání na vnější paměťové médium (kazetu, pružný či pevný disk).

Popsaný způsob vyjadřování barevnosti objektů pomocí jejich spektrálních charakteristik však nerespektuje způsob vnímání barvy lidským okem. Máme-li např. čtyři absorpční spektra čirých roztoků na obr. 1a-d, můžeme z nich usoudit, že první roztok je v celé sledované spektrální oblasti plně propustný (bezbarvý), druhý zcela nepropustný (černý) a třetí i čtvrtý jsou modré. Na základě uvedeného grafického zobrazení spekter vzorků je však prakticky vyloučeno činit další závěry o barevnosti těchto vzorků, např. zda je čtvrtý vzorek oproti třetímu fialovější či zelenější, zda je např. jasnější či sytější apod.

Koloristická interpretace barevnosti objektů a převod spektrálních veličin na koloristické je založen na teorii barevného vidění lidského oka, z nichž nejčastěji přijímanou je tzv. trichromatická teorie. Podle ní existují tři druhy receptorů barvy sítnice lidského oka (čípků), které se liší navzájem svou spektrální citlivostí tak, že jeden druh čípků je excitován zářením červené oblasti spektra, druhý zelené a třetí modré oblasti. Excitace jednotlivých druhů čípků odpovídá vjemu modré, zelené a červené barvy a celkový barevný vjem je dán jejich superpozicí a je možno jej vyjádřit mírou dílčího červeného, zeleného a modrého vjemu. Tyto počítky jsou kvantifikovány pomocí veličin R, G, B (red, green, blue), které dovolují popsat kvalitu jakéhokoli barevného vjemu lidského oka. Definovány jsou zmíněné veličiny rovnicemi 1a-c:

$$R = \int P_{\lambda} \bar{r}_{\lambda} d\lambda \quad (1a)$$

$$G = \int P_{\lambda} \bar{g}_{\lambda} d\lambda \quad (1b)$$

$$B = \int P_{\lambda} \bar{b}_{\lambda} d\lambda \quad (1c)$$

kde P_{λ} je energie lidským okem přijímaného záření při vlnové délce λ , $\bar{r}_{\lambda}$, $\bar{g}_{\lambda}$, $\bar{b}_{\lambda}$ tzv. funkce trichromatických členitelů, vyjadřující citlivost jednotlivých barevných receptorů pro záření vlnové délky λ . Integraci je třeba provádět přes celou viditelnou oblast spektra.

V souvislosti s trichromatickými členiteli je nutno upozornit na skutečnost, že schopnost barevného vnímání lidského oka se do jisté míry mění se změnou zorného úhlu, pod kterým je barevný objekt pozorován. Proto jsou pro praktické využití tabelovány hodnoty trichromatických členitelů pro jednotlivé vlnové délky buď pro tzv. dvoustupňového pozorovatele (zorný úhel 2°), nebo pozorovatele desetistupňového (zorný úhel 10°).

Vlastnosti standardního pozorovatele na základě systému RGB byly definovány v r. 1931 Mezinárodní komisí pro osvětlování (CIE — Commission Internationale de l'Éclairage). Trichromatické členitele $\bar{r}$, $\bar{g}$, $\bar{b}$ však obsahují i záporné hodnoty, což zbytečně komplikuje výpočet barevných charakteristik jednotlivých barev. Proto CIE navrhla transformaci souřadnic R, G, B na souřadnice

nové, označované X, Y, Z s týmž kvalitativním významem, avšak bez uvedeného nedostatku. Rovnice 1a-c pak přecházejí ve tvar

$$X = \int P_{\lambda} \bar{x}_{\lambda} d\lambda \quad (2a)$$

$$Y = \int P_{\lambda} \bar{y}_{\lambda} d\lambda \quad (2b)$$

$$Z = \int P_{\lambda} \bar{z}_{\lambda} d\lambda \quad (2c)$$

Mezi veličinami R, G, B a X, Y, Z však existují též přímé konverzní vztahy, uvedené např. v literatuře [6].

Velichina P v rovnicích 2a-c závisí jednak na vlastnostech pozorovaného objektu, jednak na použitém osvětlení. Při respektování této skutečnosti lze rovnice 2a-c přepsat pro čirý vzorek následovně:

$$X = \int T_{\lambda} E_{\lambda} \bar{x}_{\lambda} d\lambda \quad (3a)$$

$$Y = \int T_{\lambda} E_{\lambda} \bar{y}_{\lambda} d\lambda \quad (3b)$$

$$Z = \int T_{\lambda} E_{\lambda} \bar{z}_{\lambda} d\lambda \quad (3c)$$

kde T_{λ} je spektrální propustnost zkoumaného média a E_{λ} značí spektrální distribuci energie světelného záření, použitého k osvětlení tohoto média.

Podle rovnic 3a-c je barevný vjem určen třemi nezávislými faktory: spektrální charakteristikou zkoumaného vzorku (jeho absorpční, resp. remisní křivkou), spektrálně energetickou charakteristikou osvětlení a vlastnostmi lidského oka. Veličiny X, Y a Z v rovnicích 3a-c tedy nepopisují vlastnosti pozorovaného objektu, ale — v určitém zjednodušení — kvalitu zrakového vjemu při určitých podmínkách osvětlení a pozorování tohoto objektu. Správné pochopení a interpretace zmíněných rovnic, které vyjadřují vztah mezi spektrálními a koloristickými veličinami, je nezbytné pro pochopení dalšího textu. Význam rovnic 3a-c však nelze absolutizovat, neboť barevný vjem je psychofyzikálního charakteru a je závislý na mnoha dalších, zde nejmenovaných faktorech [7, 8, 9]. Národním dokladem této skutečnosti je známý jev, kdy v místnosti osvětlené žlutým světlem svíčky nebo červeným plamenem ohně se list bílého papíru jeví lidskému oku nadále bílý [10], což nelze na základě rovnic 3a-c vysvětlit.

Z koloristického hlediska je shodnost barevného vjemu pro dva barevné objekty podmíněna shodností jejich trichromatických složek X, Y a Z , tedy $X_1 = X_2$, $Y_1 = Y_2$, $Z_1 = Z_2$ pro dané osvětlení. Tato shoda může nastat i v případě vzorků s rozdílnými průběhy spektrálních křivek, ovšem s tím důsledkem, že při změně osvětlení vzorků dojde k porušení rovnosti trichromatických složek a tedy k rozdílnosti barevných vjemů (tzv. metamerie).

Běžné výpočetní zpracování spekter barevných roztoků na digitálních počítačích vychází z diskrétních bodů spektra, měřených podle potřeby v intervalech vlnových délek např. 1 nebo 10 nm a používá pak k výpočtu trichromatických složek X, Y, Z sumace:

$$X = \sum_{\lambda} T_{\lambda} E_{\lambda} \bar{x}_{\lambda} \Delta \lambda \quad (4a)$$

$$Y = \sum_{\lambda} T_{\lambda} E_{\lambda} \bar{y}_{\lambda} \Delta \lambda \quad (4b)$$

$$Z = \sum_{\lambda} T_{\lambda} E_{\lambda} \bar{z}_{\lambda} \Delta \lambda \quad (4c)$$

V praxi se používá předem vypočtených součinů $E_\lambda \cdot \bar{x}_\lambda$, $E_\lambda \cdot \bar{y}_\lambda$ a $E_\lambda \cdot \bar{z}_\lambda$ pro zvolené osvětlení a rozestup vlnových délek použitých spektrálních dat a standardního nejčastěji desetistupňového pozorovatele.

Obr. 1a—d. Idealizovaná spektra barevných roztoků: a) zcela propustný — bezbarvý, b) zcela nepropustný — černý, c, d) — modrý

Přestože trichromatické složky X , Y a Z jsou veličiny koloristického charakteru a vystihují tak kvalitu zrakového vjemu, je jejich používání k vyjádření barevnosti objektů nepraktické a často bývá výhodná jejich transformace do jiných souřadnic, nejčastěji do tzv. systému Lab [11], jehož aplikace přináší v praxi četné výhody. Mezi nejpoužívanější patří v současné době systém Lab podle CIE z r. 1976, založený na karteziánském souřadném systému s osami L , a a b . Osa L tohoto souřadného systému, orientovaná zpravidla vertikálně, vyjadřuje jas popisovaného odstínu (přechází od černé k bílé se stoupající číselnou hodnotou L), osa a vyjadřuje míru přechodu od zeleného odstínu (záporné hodnoty) k červenému odstínu (kladné hodnoty) a osa b obdobně vyjadřuje míru přechodu od odstínu modrého ke žlutému (obr. 2). Uspořádanou trojici barevných souřadnic L , a ,

Obr. 2. Vyjádření barevnosti v systému CIE Lab

b je jednoznačně určena barevnost objektu při určitém osvětlení. Transformaci trichromatických složek X , Y , Z na barevné souřadnice v CIE Lab barevném prostoru popisuje např. literatura [8, 12].

Pro koloristu bývá zpravidla výhodnější vyjádření polohy bodu v barevném prostoru, znázorňující barevný odstín, pomocí cylindrických souřadnic [11], jejichž přepočet z hodnot L , a , b uvádí literatura [8, 12]. Tyto souřadnice bývají zpravidla označovány L , S , H a jejich význam je následující: souřadnice S (saturation) vyjadřuje koloristickou sytost (přechod od neutrálního, šedého odstínu k odstínu čistému, brilantnímu) a vypočítá se jako vzdálenost od osy L (její význam zůstává zachován z popsaného systému Lab), souřadnice H (hue) vyjadřuje barevný tón a je dána úhlem v rovině ab od kladné poloosy a (obr. 3). Porovnáme-li tento systém LSH souřadnic, resp. specifikace barevného odstínu, s výše popsaným systémem Munsellovým, sledáme, že přes rozdílnou symboliku vyjádření koloristických veličin je jejich princip totožný. Z toho vyplývají i široké možnosti využití zmíněných systémů, neboť s velkou přesností a reprodukovatelností získaná spektrální data jsou konvertována na veličiny, které přímo vyjadřují barevný vjem v pojmech pro koloristu běžných.

Obr. 3. Využití cylindrických souřadnic L , S , H

Schematické shrnutí výše popsané problematiky je znázorněno na obr. 4, kde pojem „spektrální charakteristiky“ vyjadřuje fyzikální, objektivně měřitelné charakteristiky zkoumaného předmětu (spektrální hodnoty remise či absorpce), zatímco pojem „koloristické charakteristiky“ označuje veličiny, odvozené od kvality barevného vjemu lidského oka a vyjádřené v běžně používaných termínech.

2. BAREVNÁ DIFFERENCE A JEJÍ KVANTIFIKACE

Předchozí kapitola popisuje výhody barevného prostoru Lab, resp. LSH, spočívající v možnosti vyjádření barevnosti pro koloristu zažitými termíny, např. „modrý“, „červenější“ (ve smyslu „směrem k červené“),

Obr. 4. Systémy vyjádření barevnosti a jejich vztah

„světlejší“, „brilantnější“ apod. Zavedení tzv. uniformního barevného prostoru však přináší další velkou výhodu pro hodnocení a vzájemné porovnání barevnosti objektů, totiž možnost kvantifikace barevné odchylky.

Pojem barevné odchylky je založen na posudku lidského oka o nestejnou barevnost dvou objektů; tyto dva objekty se svou barevností mohou lišit více nebo méně a právě mírou jejich barevné odlišnosti je hodnota barevné odchylky. Odpovídá-li každému lidským okem vnímatelnému odstínu bod v barevném prostoru, nabízí se k matematickému vyjádření barevné odchylky dvou odstínů geometrická vzdálenost dvou bodů barevného prostoru. Avšak aby takovéto matematicky zpracované posudky byly prakticky použitelné, je nutno zavést takový barevný prostor, ve kterém stejně velkým vnímaným rozdílem barevnosti odpovídají stejné vzdálenosti v barevném prostoru.

Třebaže otázka optimální formulace uniformního barevného prostoru je již několik desetiletí předmětem intenzivních výzkumů a bouřlivých diskusí, nebyl dosud ideální barevný prostor výše popsanych vlastností zkonstruován. Přesto však bylo dosaženo značného pokroku ve shodě matematického vyjádření barevné odchylky s vizuálním posudkem; zatímco v XYZ prostoru by poměr vizuální a vypočtené barevné odchylky kolísal v poměru až 30:1, je tento poměr u novější vyvinutých vzorců neresrovnatelně příznivější a stále více se blíží hodnotě 1 (její dosažení by znamenalo dokonalou relaci vypočtených hodnot barevných odchylek s vizuálním posudkem).

Použijeme-li k vyjádření barevné odchylky barevného prostoru CIE Lab, formulovaného v kapitole 1, je možno vyjádřit číselnou hodnotu barevné odchylky ΔE podle rozšířené Pythagorovy věty ve smyslu rovnice

$$\Delta E = (\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2)^{1/2} \quad (5)$$

Z této rovnice zároveň vyplývá, že celkovou barevnou odchylku ΔE je možno rozložit na dílčí barevné odchylky, a to na odchylku v jasů a odchylky v chromatičnosti.

Je-li barevná diference formulována v prostoru LSH, je možné postupovat analogicky s rovnicí (5), tzn. vyjádřit celkovou barevnou diferenci pomocí dílčích diferencí v jasů, sytosti a barevném tónu:

$$\Delta E = (\Delta L)^2 + (\Delta S)^2 + (\Delta H)^2)^{1/2} \quad (6)$$

je však nutno počítat s tím, že diference ΔH nebude z matematického hlediska vyjádřena jako rozdíl úhlů, ale bude převedena do jiných jednotek. V praxi bývá rovnice (6) využíváno častěji k určení hodnoty diference ΔH pro zavedení jednotné metriky pro všechny složky barevné diference. Hodnotě ΔH se přiřazuje kladné či záporné znaménko podle toho, zda nejkratší cesta přechodu od hodnoty H_1 k hodnotě H_2 se děje rotací proti, resp. ve směru otáčení hodinových ručiček.

Za účelem dosažení lepší shody s vizuálním posudkem nežli u formule CIE Lab byla vyvinuta řada dalších, dokonalejších vzorců pro kvantifikaci barevné odchylky, z nichž patří jmenovat zejména formule M&S, Datacolor JPC 79 [13, 14, 15], CMC (1:c) [16] a formuli BFD (1:c) [17, 18].

ZÁVĚR

Objektivní způsoby vyjádření barvy se vyznačují tím, že pro popis vzorku zpracovávají řadu spektrálních údajů. Následné transformace získaných spektrálních dat slouží k tomu, aby se výsledek co nejvíce přiblížil způsobu vnímání barvy lidským zrakem. Tyto principy již našly uplatnění v řadě průmyslových odvětví (barevná fotografie, film, televize, barvířství).

Sladařský a pivovarský průmysl (rozuměj stanovení barvy sladiny a piva) je typickým příkladem odvětví, které nutně potřebuje zavedení objektivního způsobu měření. Dosud používané způsoby — Brandova škála barevných roztoků a sady barevných kotoučů pro Helligeho komparátory — trpí nevýhodami, jako je barevná nestálost roztoků či nedostatečná reprodukovatelnost jednotlivých šarží odstínů barevné škály. Dalším zdrojem chyb jsou subjektivní rozdíly barevného vnímání posuzovatelů.

Tato část práce se věnovala teoretickému popisu principů, umožňujících exaktním způsobem porovnávat barevnost materiálů. Druhá část bude věnována zpracování spektrofotometrických dat a jejich korelaci se škálou EBC.

Literatura

- [1] MUNSELL, A. H.: A Color Notation, 1.—4. vyd., Ellis, Boston, 1906—1916; 5.—11. vyd., Munsell Color Co., Baltimore, 1919—1961; in: BILLMEYER, F. W.: Color Res. Appl. 11, 1986, s. 51
- [2] JUDD, D. B., NICKERSON, D.: J. Opt. Soc. Am. 65, 1975, 85
- [3] BERNIS, R. S., BILLMEYER, F. W.: Color Res. Appl. 10, 1985, 246
- [4] TONNQUIST, G.: Color Res. Appl. 11, 1986, 51
- [5] BILLMEYER, F. W.: Color Res. Appl. 12, 1987, 173
- [6] JUDD, D. B., WYSZECKI, G.: Color in Business, Science and Industry, John Wiley and Sons, New York, London, Sydney, Toronto, 1975
- [7] STILES, W. S.: Mechanisms of Colour Vision, Academic Press, London, New York, San Francisco, 1978
- [8] McLAREN, K.: The Colour Science of Dyers and Pigments, Adam Hilger Ltd., Bristol, Boston, 1986
- [9] LANG, H.: Color Res. Appl. 12, 1987, 270
- [10] WRIGHT, W. D.: Color Res. Appl. 12, 1987, 119
- [11] McLAREN, K.: J. Soc. Dyers Colour. 97, 1981, 498
- [12] Bayer Farben Revue 24, (1986), Sonderheft 3/2D („Farbmessung“)
- [13] McDONALD, R.: J. Soc. Dyers Colour. 96, 1980, 372
- [14] McDONALD, R.: J. Soc. Dyers Colour. 96, 1980, 418
- [15] McDONALD, R.: J. Soc. Dyers Colour. 96, 1980, 486
- [16] CLARKE, F. J. J., McDONALD, R., RIGG, B.: J. Soc. Dyers Colour. 100, 1984, 128
- [17] LUO, M. R., RIGG, B.: J. Soc. Dyers Colour. 103, 1987, 86
- [18] LUO, M. R., RIGG, B.: J. Soc. Dyers Colour. 103, 1987, 126

Lektoroval Ing. Jan Masák, CSc.

Bartko, A. - Gotvald, J.: Použití spektrálních dat a výpočetních metod pro stanovení barvy. I. Teoretické základy barevného vnímání. Kvas. prům., 35, 1989, č. 10, s. 292—296.

Objektivní způsoby vyjádření barvy se vyznačují tím, že pro popis vzorku zpracovávají řadu spektrálních údajů. Následné transformace získaných spektrálních dat slouží k tomu, aby se výsledek co nejvíce přiblížil způsobu vnímání barvy lidským zrakem.

Práce je věnována teoretickému popisu principů umožňujících exaktním způsobem porovnávat barevnost materiálů.

Бартко, А. - Готвальд, И.: Использование спектральных данных и вычислительных методов для определения

цвета. I. Теоретические основы восприятия цвета. Квас. прум., 35, 1989, № 10, стр. 292—296

Объективные способы выражения цвета отличаются тем, что они в целях описания образца обрабатывают ряд спектральных данных. Последующие преобразования полученных спектральных данных служат для того, чтобы результат приблизился как можно наиболее способу восприятия цвета глазом человека.

Работа посвящена теоретическому описанию принципов, позволяющих экзактным способом сопоставлять цветность материалов.

Bartko, A. - Gotvald, J.: Application of Spectral Data and Computation Methods for Colour Determination. I. Theoretical Basis of Colour Perception. Kvas. prům., 35, 1989, No. 10, pp. 292—296.

Objective procedures of a colour determination for the sample description use a scale of spectral values. Gradual transformations of the spectral data are carried

out with the aim to achieve the result approaching a colour perception with the human eye. The study is focused on the theoretical description of principles for an exact procedure of the comparison of coloured materials.

Bartko, A. - Gotvald, J.: Anwendung der Spektraldaten und Berechnungsmethoden zur Farbenbestimmung. I. Theoretische Grundlagen der farbigen Wahrnehmung. Kvas. prům., 35, 1989, Nr. 10, S. 292—296.

Die objektiven Methoden der Farbencharakteristik sind dadurch gekennzeichnet, daß für die Beschreibung der Probe eine Reihe von Spektralangaben verarbeitet wird. Die nachfolgenden Transformationen der gewonnenen Spektraldaten dienen der maximalen Annäherung der Ergebnisse der Art der Wahrnehmung der Farbe durch das menschliche Auge.

Der Artikel ist der theoretischen Beschreibung der Prinzipien gewidmet, die einen exakten Vergleich der Farbigkeit der Materiale ermöglichen.