

Fotometria és színmérés a 21. században

Bevezetés

A fény és szín meghatározása az emberiséget történelmének korai időszaka óta izgatta. Évszázadokon keresztül csak feltételezéseket tudtak tenni a fényérzet kialakulásának magyarázatára. Newton, majd Young és Helmholtz munkássága nyomán születtek meg az első tudományos magyarázatok a fény- és színészlelet kialakulásának okairól és magyarázatára^{1,2}. A fotometriai összefüggéseket a 18. században kezdték feltárni³. A számszerű összefüggések meghatározása szempontjából alapvető fontosságú volt Abney munkássága⁴, aki kimutatta, hogy bizonyos körülmények között több megvilágítás által létrehozott észleletek additívak. Az egységes fénymérés alapjait ezen felismerésre alapozva a Nemzetközi Világítástechnikai Bizottság (CIE) az 1924-es kongresszusán fektette le⁵.

A színngermérést a fotometriára felépítve 1931-ben egységesítette a CIE⁶. Az azóta eltelt 70 év alatt mind a fotometria, mind a színmérés területén számos újabb felismerés született, az egyes mérési rendszerek megújítására számos elképzelés született, illetve eljárás került kidolgozásra^{7,8}. A világítástechnikus által használt mérőműszerek azonban napjainkban is az 1924-ben, illetve 1931-ben lefektetett alapelveken működnek, azaz megvilágítást vagy fényssűrűséget, illetve színngeroösszetevőket mérnek az 1924-es láthatósági függvény ($V(\lambda)$ görbe) és az 1931-es $x(\lambda)$, $y(\lambda)$, $z(\lambda)$ színképi érzékenységi

függvények alapján. Ugyanakkor tudjuk, hogy az emberi észlelő különböző látási körülmények között a fentiektől eltérő színképi érzékenységekkel észleli a különböző színképi teljesítmény-eloszlású sugárzásokat, nem azok erősségére, hanem sokkal inkább az egymás mellett jelentkező sugárzások viszonylagos erősségére, a kontrasztra érzékeny. Mindez a világítástechnikai mérések megújítását teszi szükségessé, hogy mérési eredményeink jobban leírják észleleteinket.

A fotometriával és színméréssel kapcsolatos új igények

A világítástechnikai tervezés területén megnöttek az igények. Míg a múlt század első felében a fejlődést az egyre nagyobb megvilágítás megvalósítása jelentette, a század második felében bekövetkezett energiaválság a hatékonyabb, az adott feladathoz jobban illeszkedő világítás igényét helyezte előtérbe. Míg korábban egyenletes, magas szintű megvilágításra törekedtek, hogy ne maradjon a látótérben olyan terület, melyet a dolgozó esetleg nem lát megfelelően, most megjelent az adott feladathoz jobban igazodó világítás iránti igény. Ezzel kapcsolatban újra kellett gondolni a világítás egyenletességére vonatkozó követelményeket.

Második jellemzőként általánosan elterjedté váltak a képernyős munkahe-lyek, s ezek más világításokat igényeltek – és igényelnek még ma is az egyre jobb

minőségű képernyők ellenére – mint a korábbi irodai és egyéb munkahelyek. Fokozottan előtérbe került a káprázás elkerülésének kérdése, a fényirányítás jobb megvalósításának igénye.

Az energiahány kismértékű enyhülése után nem az egyre nagyobb megvilágítások irányába fejlődött tovább a világítástechnika, hanem felmerült a látási komfort javításának az igénye, ami együtt járt a jobb minőségű mesterséges világítás (quality lighting⁹) kialakításának kutatásával. Ennek során felismerték a kutatók, hogy nem az egyenletes, hanem a különböző látási feladatokhoz igazodóan különböző értékű megvilágítások biztosítják a legjobb és legkedvezőbb látási körülményeket. Az is kiderült, hogy az időbeli egyenletesség területén is tehetünk engedményeket, sőt a megfelelően változó világítás stimuláló hatású is lehet^{10, 11}.

A következő három ábra Marc Fontoyont munkája¹² alapján mutatja, hogy adott képernyős munkahelyen a különböző látási feladatokhoz milyen fényssűrűség és megvilágítási értékeket találtak optimálisnak.

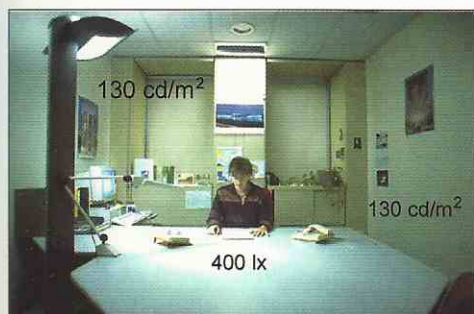
Az 1. ábrán az írás-olvasás feladathoz talált optimális fényeloszlásokat látjuk, a 2. ábrán a számítógépes munkához optimalizált fényeloszlást, míg a 3. ábrán a megbeszéléshez szükségesnek ítélt fényeloszlást tüntettük fel. Mint látható, a



2. ábra: Fényeloszlás számítógépes munkához

különböző feladatokhoz más-más fényssűrűség és fényeloszlás érték bizonyult optimálisnak. Mai modern fényszabályozós eljárásokkal az egyes felületek optimális fényssűrűségét, illetve megvilágítását be tudjuk állítani, de ezeket hagyományos eszközökkel ellenőrizni igen fáradságos munka.

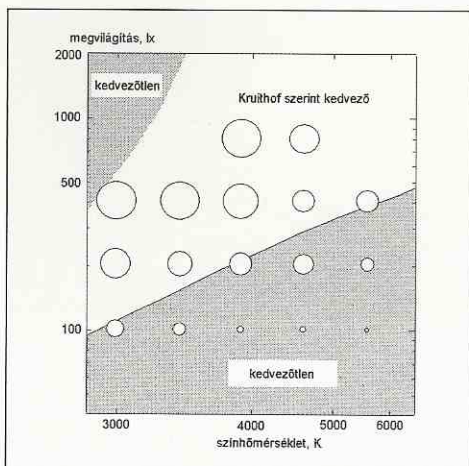
Hasonló problémákkal találkozunk, ha a fényforrások vagy a kialakítandó felületek színi kérdéseit tekintjük. A világítástechnika területén régóta vitatottak Kruithof 1941-ben tett megállapításai¹³, miszerint összefüggés mutatható ki a világítás kedvező fogadtatása, a létrehozott megvilágítás és a világításra használt fényforrások színhőmérséklete között. Kruithof szerint a fényforrás színhőmérsékletének növekedésével nagyobb megvilágításra van szükség ahhoz, hogy a környezetet kedvezőnek ítéljük meg. Természetesen túlzottan nagy megvilágítás



1. ábra: Fényeloszlás írás-olvasáshoz



3. ábra: Fényeloszlás megbeszéléshez



4. ábra: Nakamura és Oki kísérleteinek eredménye közösségi tér esetén; a két árnyékolt terület a Kruithof kísérletek alapján a nem kedvelt színhőmérséklet–megvilágítás tartományokat szemlélteti. A növekvő körök a szerzők kísérletei alapján a növekvő kedvezőséget szemléltetik

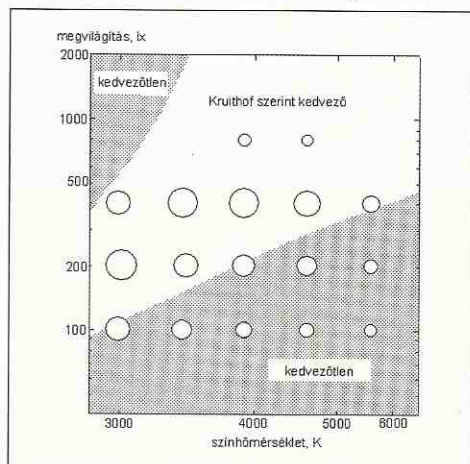
esetén megint kedvezőtlenebb a hatás. Davis és Ginthner¹⁴ nem tudta ezt a jelenséget igazolni. Nakamura és Oki kutatásai¹⁵ úgy tűnik, meghozták a megoldást: az optimális megvilágítás és színhőmérséklet függ a térben való foglalatosságától. A 4. ábrán közösségi térben történt vizsgálatok eredményét szemlélteti. A két görbe közötti terület Kruithof vizsgálatai szerinti elfogadott színhőmérséklet–megvilágítás tartományt mutatja. A Nakamura és Oki vizsgálatok eredményét a szerzők az egyes színhőmérséklet–megvilágítás értékekkel megvilágított közösségi belső térben szemantikus skálán megállapított kedvezőséggel jellemezték: nagyobb körök szívesebben használt színhőmérsékletű és megvilágítású belső térre vonatkoznak.

Hasonló összefüggést láthatunk az 5. ábrán, de ebben az esetben egy személy önmagában töltötte idejét a belső térben, pl. szórakoztató könyvet olvasott (azaz nem munkavégzési feladatot látott el).

A két ábra összehasonlításából látható, hogy – a japán észlelőkkel végzett kísérletek esetén – a közösségi elfoglaltsághoz nagyobb megvilágítási értékeket és nagyobb színhőmérsékletet preferáltak a megfigyelők, mint egyedi foglalatosság esetén.

Várható, hogy ez a jelenség kultúrkör-függő, és hatással lehet rá a fényforrások színviSSzaadási indexe is. Különösen érdekessé válhat ez a legmodernebb világító-diódás megvilágítások esetén, mert az ezekkel megvalósítható fényeloszlás és a pillanatnyilag létrehozható színekép lényegesen eltér a hagyományos értékektől. Ez új kutatási területet nyithat, s a 21. század világítástechnikai mérés technikájának az ilyen feladatok megoldására is fel kell készülnie.

De nem csak belsőterek világításánál tapasztalhatunk új kihívásokat. A múlt század második felében gyors egymásutánban terjedt el a fénycsöves, a nagy nyomású higanylámpás, majd a nagy nyomású nátriumlámpás és a fémhalogénlámpás utcavilágítás. A kísérleteket, melyek alapján az egyes rendszereket propagálták, a nagy fényforrásgyártók kültéri laboratóriumaiban végezték, mi-



5. ábra: Egyedi elfoglaltság esetén megfigyelt kedvezőségi értékek

vel független vizsgáló állomásoknak nem voltak ilyen laboratóriumi lehetőségeik. Időközben kialakult a szimulált laboratóriumi vizsgálatok módszere (virtuális valóság megjelenítések) és így a kísérletekbe be tudtak kapcsolódni az egyes egyetemi munkahelyek is. Ezekben nagy figyelmet fordítottak annak a kérdésnek, hogy milyen feladatoknál az emberi látószerv mely mechanizmusai működnek.

Ma már tudjuk, hogy a szemünk retinájában kétféle receptorunk van, a csapok felelősek a nappali látásért, és a foveában az éleslátásért, a pálcikák szerepe az alkonyi látásban nő meg, s a legkisebb fénysűrűségek (szkotopos látás) esetén a látás egyedüli közvetítői. Szerepük van azonban a nappali látás körülményei között is, mert egyrészt a pupilla átmérő szabályozásában vesznek részt, másrészt a perifériális látás (a fő nézési iránytól nagy szögtávolságra, pl. 45° – 70°) szinte egyedüli közvetítői. Azt is tudjuk, hogy a csaplátás esetén más idegpályák közvetítik a részletfelismerés szempontjából lényeges vizuális fénysűrűség jellegű információt (melyre Abney törvénye teljesül, s mely jól leírható az 1924-ben szabványosított $V(\lambda)$ görbével, illetve annak kissé módosított $V_M(\lambda)$ görbéjével, és a világosság információt (a sötétben-látás esetén érvényes $V'(\lambda)$ függvény világosság jelet észlel).

Napjainkban indult meg az a kutatás, mely igyekszik külön-külön meghatározni az egyes megfigyelési feladatokhoz szükséges mérési feltételeket^{16, 17}. Végző következtetéseket még korai lenne levonni, de a megkezdett vizsgálatokból úgy tűnik, hogy a különböző tevékenységekhez más-más jellemzők meghatározására lesz szükség, s ahhoz, hogy ezeket meg tudjuk mérni, ismernünk kell majd a szemünket érő színképi teljesítmény-eloszlást, s azt különböző súlyozó függvényekkel kell majd értékelni, s az így értékelt

összetevőkből az eredő mérési adatokat számítani. Súlyozó függvényekként a 2° -os és 10° -os színinger mérő-észlelő, a világosban és sötétben látás $V_M(\lambda)$ és $V'(\lambda)$ függvényére lesz szükség.

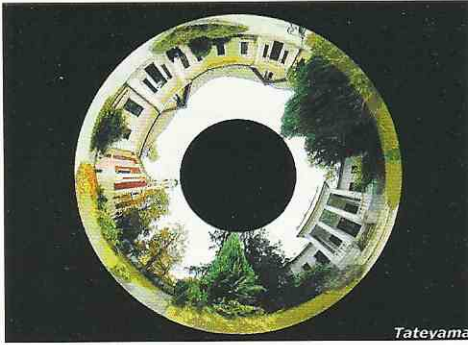
Az egyes súlyozó függvényekkel meghatározott részeredményekből az adott világítási helyzet számára optimális fotometriai és színinger-metrikai leírás figyelembe kell, hogy vegye azt, hogy adott környezetben hozzászokunk a környezetünk fény- és színviszonyaihoz¹⁸, sőt a színes kép agyi feldolgozása során különböző kognitív hatások is érvényesülnek^{19, 20}.

Az új évszázad fotometriai és színmérő műszerei

Első lépésként nyilván azt fogjuk látni, hogy a hagyományos megvilágítás-mérőket és fénysűrűség-mérőket kiegészítik a $V'(\lambda)$ függvény szerint értékelő mérőfejjel, és készítenek olyan programokat, melyek a világosban és sötétben látás közötti tartományban (mezopos látás) értékelik egyrészt a fénysűrűséget, másrészt a világosságot. A közúti világítás területén jelentkező feladatok zöme (gyors felismerés, akadályok elkerülése, navigálás) a látómechanizmus vizuális fénysűrűség csatornáját használják, ezért a $V(\lambda)$ és a $V_{10}(\lambda)$ * szerinti értékelésnek van nagy jelentősége.

A másik nagy lépést a látótér pontonkénti letapogatása helyett teljes képek értékelése jelenti. Berrutto és Fontoy-nont²¹ már hét évvel ezelőtt összefoglalta, hogy milyen előfeltételek szükségesek ahhoz, hogy CCD kamerákat (mint amelyeket a modern videofelvevők és digitális fényképezőgépek használnak) le-

* $V_{10}(\lambda)$ függvény ma még nem szabványos, de egy CIE Technikai Bizottság dolgozik eladási feltételeinek kidolgozásán.

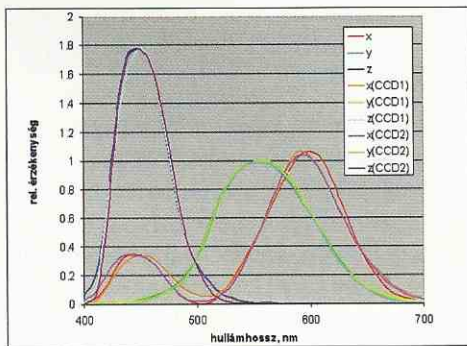


6. ábra: Panoráma felvétel speciális panoráma-optika segítségével

hessen fénysűrűség-eloszlás mérésére használni. Idő közben a számítástechnika megoldotta a panorámaképek kisimítását (lásd 6. ábra és 7. ábra).

A műszergyártók feladata, hogy a CCD érzékelők színeképi érzékenységét olyanra alakítsák, hogy az lehetővé tegye a CIE színinger mérő-észlelő szerinti feldolgozást. A fotometria és színtan kutatóinak feladat pedig, hogy megtalálják azokat az összefüggéseket, melyek a kialakított szomszédos pixelek közötti kölcsönhatást figyelembe veszik.

Az első feladat megoldása felé már megtettük az első lépéseket. A 8. ábrán



8. ábra: A CIE színinger-megfeleltető függvények és két CCD kamerával megvalósított színeképi érzékenyséeloszlás

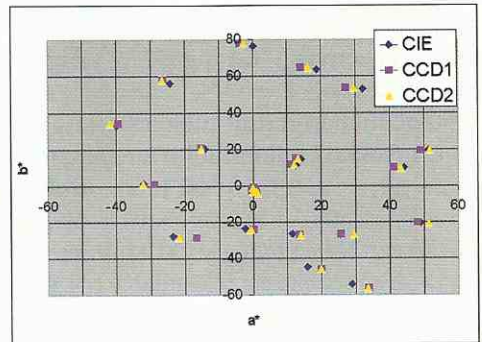


7. ábra: A 6. ábrán bemutatott panoráma felvétel kisimított képe*

feltüntettük két CCD kamera színeképi érzékenységét és a CIE színinger-megfeleltető függvényeket. Természetesen az ilyen ábrából még a gyakorlott színmérő is csak nehezen tudja megbecsülni, hogy az ilyen detektorral felszerelt műszer mekkora hibával fog mérni. Ezért elvégeztük a napjainkban gyakran használt Macbeth gyártmányú Color Checker Chart egyes színmintáinak színinger-meghatározását, ábrázoltuk a szabványos értékeket és a két kísérleti CCD-vel mért értékeket a CIE-LAB rendszerben.

A 9. ábrán láthatók az eredmények. Látszik, hogy van a színdiagramnak olyan területe, melyben az egyik, s van olyan területe, melyben a másik illesztés ad jobb eredményt. A részletes analízis azt mutatta, hogy az átlagos eltérések kisebbek, mint $3 DE_{ab}^*$ egység, és a maximális eltérések is kisebbek mint $8 DE_{ab}^*$ egység.

Más kísérleteink²² azt mutatták, hogy az



9. ábra: A Macbeth Color Checker Chart 24 színmintájának a^* , b^* koordinátája a szabványos (CIE) színinger-megfeleltető függvényekkel és a két kísérleti CCD kamerával meghatározva

*A szerző köszönetet kíván mondani a Tateyama-Hungary cégnek a két kép rendelkezésre bocsátásáért.

egyedi szórások ennél nagyobbak, ezért CCD kamerákkal felvett képek kiértékelésére már a jelenlegi színi korrekciók is megfelelnek. Megoldatlan azonban a színi áthangolódás, a színingerek kölcsönhatásának, a látott jelenet és a számítógépen megvalósított másolata közötti szín-élmény helyes konverziója. Ennek megoldásához még meg kell találni a megfelelő algoritmusokat, és ahhoz, hogy a szükséges transzformációkat reális idő alatt el tudjuk végezni még a számítástechnika területén is további fejlesztésre van szükség. Egy lehetséges utat mutat ehhez a celluláris neurális hálózatokon (CNN) alapuló analóg számítási eljárások felhasználása. Ezzel a kérdéssel kutatócsoportunk aktívan foglalkozik.

Összefoglalás

Az emberi színes látás jobb megértése és egyre újabb világító eszközök kialakulása a fotometriát és színingermérést is új feladatok elé állította. Egyrészt világosan látszik, hogy nem lehet minden emberi tevékenységhez ugyanazt az egyetlen láthatósági függvényt ($V(\lambda)$) alkalmazni. Élesen kettéválk a munkavégzés során való részletdús feladatok látása és a nagyobb felületek világosságának észlelése. Az első csoport megoldásához a

láthatósági függvény, vagy annak továbbfejlesztett változatai használhatóak. Ilyenek a rövidebb hullámhosszak tartományában korrigált láthatósági függvény, a $V_M(\lambda)$ függvény, mely világító diódás és képernyős munkahelyek esetén végzett észleléseknél már számításba veendő; és a nem közvetlenül előttünk fekvő tárgyak észlelésénél használható $V_{10}(\lambda)$ függvény.

Bonyolultabb kérdés a fentiek kombinálása a sötétben látás $V(\lambda)$ függvényével, azaz a mezopos látás viszonyai között a gyors felismerés problémája. Ez a helyzet a közvilágítás esetén. Itt a megfelelő fotometriai rendszer megtalálása egyrészt a baleset-elhárítás szempontjából fontos, másrészt utat mutathat a fényforrás fejlesztők számára nagyobb fényhasznosítású fényforrások kidolgozására.

Az életminőség javításához elengedhetetlen a világítás (természetes és mesterséges) által létrehozott világosság és színezlet korrelátumainak meghatározása. Jelenlegi ismereteink szerint úgy hisszük, hogy az ehhez szükséges fizikai eszközök (megfelelően illesztett CCD kamerák) rendelkezésre állnak, de a kiértékelő algoritmusok és azok kellő gyorsasággal működő implementációja még kutatási feladat.

Dr. Schanda János

IRODALOM:

1. Cohen JB, Visual color and color mixture, *Univ. Of Illinois Press*, Urbana and Chicago, 2001.
2. Johnston SE, A history of light and colour measurement, *Inst. of Physics Publ.*, Bristol and Philadelphia, 2001.
3. Lambert JH, Photometry or on the measure and gradations of light, colors and shade, translation from the Latin of Photometria sive de mensura et gradibus luminis, colorum et ambræ by David L. DiLaura, *IES of NA*, 2001
4. Abnely W deW, Researches in Colour Vision and the Trichromatic Theory, published by Longman, Green & Co. in 1913.
5. Commission Internationale de l'Éclairage, Principales décisions (6e Session, 1924), *CIE Sixième Session, Genève*, Juillet, 1924. Recueil des Travaux et Compte Rendu de Séances, Cambridge, the Univ. Press, 1926, pp. 67–69.
6. Bureau International des Poids et Mesures: Comité Consultatif d'Électricité, Session of 1930, *CIPM Procès-Verbaux* 14, 75–318, 1931.
7. Schanda J, Morren L, Rea M, Ronchi L, Walraven P, Does lighting need more photopic luminous efficiency functions? *Lighting Res. Technol.* 34/1 69–78 2002.
8. Schanda J, Photometric and colorimetric

- descriptors of the 21st century, *Royal Soc. Symposium on the Visual Environment*, April 2002.
9. CIE: Proceedings of the first CIE symposium on lighting quality, *CIE x015:1998*.
 10. Dehoff P. Active light – meaningful changes in lightning. *Proc. Lux Europa*, Reykjavik pp. 209–212, 2001.
 11. Majoros AT. Effects of dynamic lighting. *Proc. Lux Europa*, Reykjavik pp. 213–214, 2001.
 12. Fontoynt M. Lighting quality for the well-being at the work place, *Visual Environment Symposium*, the Royal Society, London 2002.
 13. Kruithof, A. A. Tubular luminescence lamps for general illumination. *Philips Technical Review* 6(3):65–73, 1941
 14. Davis, R.G. and Ginthner, D. N. Correlated color temperature, illuminance level, and the Kruithof curve. *J. Illum. Eng. Soc.* 27–38, 1990.
 15. Nakamura H, Oki M, Effect of colour temperature and illuminance on preference of atmosphere, and Kruithof curve, *Visual Environment Symposium*, the Royal Society, London 2002.
 16. Rea MS, A unified system of photometry for lighting application. *Proc. of the CIE Symp. '99, 75 years of CIE photometry*, pp. 10-1 – 10-8 CIE x018-1999.
 17. Schanda J, Morren L, Rea M, Ronchi L, Walraven P, Does lighting need more photopic luminous efficiency functions? *Lighting Res. Technol.* 34/1 69–78, 2002.
 18. CIE TC 1–52 Chromatic Adaptation Transform (CAT).
 19. Kutas G, Bodrogi P, Schanda J, Effect of the lateral size of the colour stimulus on colour perception, submitted for the CIE Symposium “Temporal and spatial aspects of light and colour perception and measurement”, Veszprém 2002.
 20. Bodrogi P, Tarczali T, Colour memory for various sky, skin, and plant colours: effect of the image context, *COLOR Res. Appl.* 26/4, pp. 278–289, 2001.
 21. Berrutto V, Fontoynt M, Applications of CCD cameras to lighting research: Review and extension to the measurement of glare indices, *CIE 23rd Session, New Delhi* pp. 192–195, CIE 119–1995.
 22. Borbély Á, Schanda J. The usability of the CIE colour matching functions in case of CRT monitors. *COLOR Res. and Appl.* 26/6 436–441, 2001.