

SZÍNDISZKRIMINÁCIÓ A KONFÚZIÓS IRÁNYOK MENTÉN

CHROMATIC DISCRIMINATION TOWARDS THE CONFUSION POINTS

Urbin Ágnes,¹ Nagy Balázs Vince²

¹ Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Mechatronika, Optika és Gépészeti Informatika Tanszék. Budapest, Magyarország, urbin@mogi.bme.hu

² Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Mechatronika, Optika és Gépészeti Informatika Tanszék. Budapest, Magyarország, nagyb@mogi.bme.hu

Abstract

In this paper chromatic discrimination thresholds of normal colour-observers are analysed. Measurements were obtained with the Cambridge Colour Test, in different reference points. The results show differences in terms of the reference chromaticities. Reference points within the gamut of a CRT display were found where thresholds of normal colour observers measured towards the confusion points exceeded the normative upper threshold limit of normal colour observers. The discrimination thresholds estimated towards the confusion lines based on Trivector measurements exceeded the thresholds estimated by the Ellipse tests. Our results indicate that in case of determination of discrimination ellipses, measurements towards the confusion points are recommended.

Keywords: *chromatic discrimination, confusion point, just noticeable difference, Cambridge Colour Test.*

Összefoglalás

A publikációban bemutatott kutatás során épszínlátó személyek színdiszkriminációs küszöbértékei kerültek összehasonlításra. A küszöbértékek a Cambridge Colour Test Ellipszis és Trivector moduljaival kerültek meghatározásra, különböző referenciapontokhoz képest. Az eredmények különbséget mutatnak a referenciapontok elhelyezkedésének függvényében. A konfúziós irányokban mért küszöbértékek esetén egy CRT-monitor gamutján belül találhatóak olyan referenciapontok, amelyek körül épszínlátó személyek eredményei is meghaladhatják az épszínlátó személyek küszöbértékeinek felső határértékét. A konfúziós irányok mentén, Trivector mérések alapján becsült küszöbértékek meghaladták az ellipszistesztek által a konfúziós irányokban meghatározott küszöbértékeket. Az eredményeink alapján színdiszkriminációs ellipszisek meghatározásakor javasolt a konfúziós irányok mentén is méréseket végezni.

Kulcsszavak: *színdiszkrimináció, konfúziós pont, legkisebb észlelhető küszöbérték, Cambridge Colour Test.*

1. Bevezetés

A színlátás vizsgálatának egyik alapvető tárgya a színdiszkriminációs képesség vizsgálata, mely alapján fény derülhet veleszületett színlátásproblémákra, mint pl. a szintévesztés valamely formájára [1], betegségek korai stádiumának jelzésére, mint pl. a cukorbetegség [2], ártó környezeti hatások eredményeképp bekövetkező problémák kimutatására [3, 4] vagy akár életkor függvényében történő változásokra [5].

Mindemellett, a színdiszkriminációs képesség vizsgálata és feltérképezése fontos lépés a színkülönbségek és az egyenletes színrendszerek definíciói felé vezető úton, illetve azok ellenőrzésében [6–8].

A mérési módszernek, illetve a kísérleti tervnek természetesen összhangban kell lennie az aktuális kutatás céljával, ezért a színlátáskutatás történetének évtizedei alatt számos vizsgálati módszer fejlesztettek és alkalmaznak a mai napig különböző klinikai és kutatási célokra [9, 10].

A színlátás kutatásának egyik legnagyobb szépsége egyben annak nehézsége is, nevezetesen, hogy a színek a megfigyelő nélkül nem léteznek. A színérzékelés és a színészlelés méréséhez és tanulmányozásakor a mérőrendszer szerves része az emberi látórendszer, így a mérési módszerek egy nagy kihívása az emberi hibatényező minimalizálása.

Épp ezért, habár a szakirodalom foglalkozik a nagy színkülönbségek meghatározásával és összehasonlításával [11, 12], a szindiszkrimináció mérendő mennyisége jellemzően a legkisebb észlelhető küszöbérték, vagyis az a legkisebb színkülönbség, amelyet a megfigyelő még meg tud különböztetni.

Ennek mérésére több módszerrel találkozhatunk a szakirodalomban. A színegyeztetés során jellemzően egy osztott látómező egyik felében megjelenő színingert kell megvalósítani a másik félben, adott alapszínekből. Itt a fő paraméterek a referencia színinger, valamint a keveréshez használható alapszínek. Erre általános gyakorlati példa az anomaloszkóp, de ilyen módszerrel végezte MacAdam is azt a szindiszkriminációs mérést, amely a mai napig egy meghatározó adatbázist (az ún. MacAdam-féle ellipsziseket) nyújt a színtan világának [13].

Egy szintén elterjedt módszer a színsorokból álló teszt, ahol a mintákat valamilyen szintani paraméterük (jellemzően színezetük) alapján sorba kell rendezni. Itt a sorban egymást követő minták között észlelhető különbség nagysága a meghatározó paraméter, legyen az a világosság, színezet, telítettség vagy ezek valamely kombinációjának értelmében definiálva. Ilyen tesztre példa az FM-100HUE- vagy a D15-teszt, de ilyen vizsgálatot ajánl az érzékszervi szakértő bírálók kiválasztásához útmutatásul szolgáló szabvány is [14].

A klinikai gyakorlatban elterjedtek a pseudoizokromatikus tesztek, amelyek alapelemei olyan ábrák, amelyeken adott tartományon belül véletlenszerű méretű és elhelyezkedésű foltokból áll össze egy kép. A képen belül a foltok világossága véletlenszerűen változik, míg a foltok színezete alapján elkülöníthető egy háttér és egy minta. A feladat a minta kiolvasása, ami csak akkor lehetséges, ha a minta és a háttér színezete között észlelhető színingerkülönbség meghaladja a megfigyelő legkisebb észlelhető küszöbértékét. Ennek egyik legelterjedtebb változata az Ishihara-teszt, amelyet kifejezetten a szintévesztés deuteranómia- és protanómia típusainak detektálására használnak klinikai gyakorlatban [15]. A módszer alapja, hogy a pseudoizokromatikus ábrák hát-

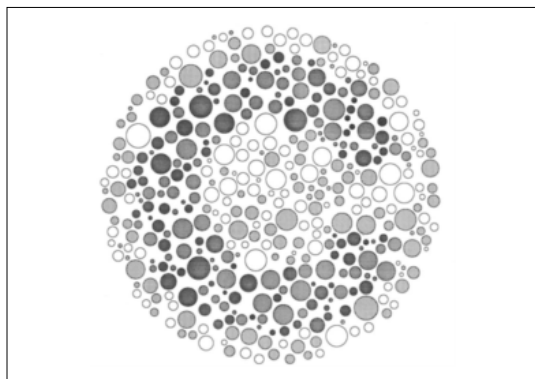
terei és a kiolvasandó minták olyan színpárokat alkotnak, amelyek a protan- vagy a deutan-konfúziósirányok mentén helyezkednek el, így a szintévesztő személyek számára a színkülönbség nem vagy csak nagyon nehezen érzékelhető.

Az Ishihara-teszthez hasonló, színlátáskutatásban elterjedt pseudoizokromatikus teszt a Cambridge Colour Test (CCT), amelynek előnye a nyomtatott Ishihara-teszttel szemben, hogy monitoron végezhető, így a szintévesztés meghatározásán túl adott kutatásokhoz illesztett beállításokkal végezhető [16, 17]. A tesztábrákon egy Landolt C mintát kell kiolvasni (ld. 1. ábra), és annak orientációját megadni egy távirányító segítségével. A teszt fő paraméterei a pseudoizokromatikus ábrák háttérének (a referenciapontnak) és mintájának színe, valamint az ábrákon megjelenő fénysűrűségzaj tartománya.

A teszt adaptív, a résztvevő válaszai alapján folyamatosan növeli vagy csökkenti a különbséget a teszt során változatlan referencia-színpont és az aktuálisan felismerendő minta színei között. Ez az adaptivitás, valamint a kalibrált CRT-monitor és a ViSaGe MkII színingergenerátor alkalmazása nemcsak sérült szindiszkriminációs képességű személyek vizsgálatára, hanem akár épszínlátó személyek színlátása közötti különbségek kimutatására is lehetőséget nyújt.

A teszt natív színrendszere a CIE 1976 UCS szín-diagram, így a színkoordinátákat (u^* ; v^*) koordinátákként, a mérés eredményeül szolgáló küszöbértékeket pedig $\Delta E_{u^*v^*}$ színkülönbségként adja meg.

A CCT két modulja az ellipszisteszt és a Trivector-teszt. Az ellipszisteszt esetében a küszöbértékeket a referenciapontból egyenközű irányokban



1. ábra. A Cambridge Colour Test egy tesztábrája. A sötétebb pontok jelölik a felismerendő mintát, a világosabb pontok a háttérrel. A valóságban a pseudoizokromatikus ábrán ez a két terület nem világosságban, hanem színezetben tér el egymástól [18].

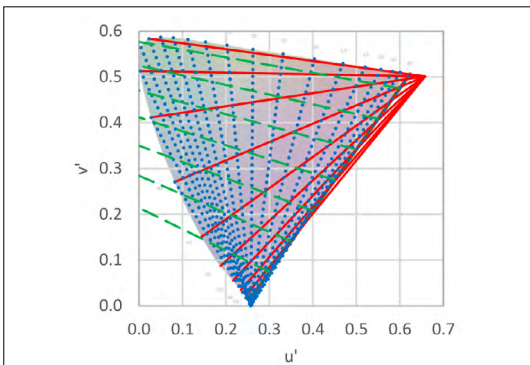
felvett mérési irányokban határozza meg, majd az így kapott küszöbértékek és a referenciapont ismeretében legkisebb négyzetek módszerével egy ellipszist illeszt be az adatokra, amellyel az a terület becsülhető meg, amelyen belül a megfigyelő nem lát különbséget a színek között.

A Trivector-teszt adott referenciapontból a három konfúziós irányban ad eredményt. A konfúziós irányok a CIE 1931 vagy 1976 UCS színdiagram bármely színpontjából a három konfúziós pont egyikébe mutató irányok. A **2. ábra** a CIE 1976 UCS színdiagramban ábrázolja a protan- (0.6579;0.5013), a deutan- (1.2174;0.7826) és a tritan- (0.2573;0.0000) konfúziós pontok felé tartó konfúziós irányokat.

A CCT hivatalos útmutatója alapján [17] a Trivector-teszten protan- és deutan-konfúziósirányban $100 \cdot 10^{-4}$, tritan-konfúziósirányban pedig $150 \cdot 10^{-4}$. $\Delta E_{u'v'}$ -színkülönbséget meghaladó küszöbérték esetében színtévesztésről beszélhetünk. Az ellipszisteszt kiértékelésekor jellemzően 2.0 alatti tengelyarány esetében tekintendő normálisnak a színlátás. A szakirodalomban fellelhető [19], mérések alapján meghatározott normatív felső és alsó Trivector-teszteredmény-határértékek épszínlátó személyek esetén a (0.197;0.469) referenciapontban mérve a következők:

- protan: $25.2 \cdot 10^{-4}$; $69.3 \cdot 10^{-4}$;
- deutan: $24.7 \cdot 10^{-4}$; $82.4 \cdot 10^{-4}$;
- tritan: $37.3 \cdot 10^{-4}$; $113.4 \cdot 10^{-4}$.

Az ellipszistesztről a következő 3 referenciapontban ismertek normatív értékek épszínlátó személyek esetén: Field 1: (0.197;0.469), Field 2: (0.193;0.509), és Field 3: (0.204;0.416). A normatív értékek a nagytengely hossza, valamint a nagy- és kistengelyek aránya:



2. ábra. Protan- (folytonos piros vonalak), deutan- (szaggatott zöld vonalak) és tritan- (pöttyözött kék vonalak) konfúziós irányok a CIE 1976 UCS színdiagramban ábrázolva.

- Field 1: $127.7 \cdot 10^{-4} \pm 35.8 \cdot 10^{-4}$; 1.6 ± 0.3 ;
- Field 2: $142.1 \cdot 10^{-4} \pm 38.7 \cdot 10^{-4}$; 1.6 ± 0.4 ;
- Field 3: $174.9 \cdot 10^{-4} \pm 47.7 \cdot 10^{-4}$; 2.2 ± 0.5 .

Míg a szakirodalomban fellelhető CCT-mérések célja jellemzően különböző csoportok összehasonlítása a CCT-kézikönyvben megadott referenciapontokban [5, 20, 21], arról kevés adat található, hogy a semleges szürkétől erősen eltérő referenciapontokban milyen küszöbértékek várhatóak eredményül. Jelen cikk szerzői által publikált tanulmányban [22] egy CRT-monitor teljes gamutját lefedő referenciapont-hálóban végzett Trivector-tesztsorozat alapján megállapítható, hogy a referenciapontokat a semleges ponttól valamely konfúziós irány felé eltolva, az eltoló referenciaponttól a fenti konfúziós irány felé mért küszöbérték nagymértékben növekszik, és ez a növekedés matematikai modellel becsülhető.

Jelen cikkben bemutatott kutatásunk célja annak vizsgálata, hogy a konfúziós irányok felé mért küszöbérték-növekedés kimutatható-e az ellipszistesztek esetében is.

2. Módszerek

A méréseket épszínlátó egyetemi hallgatók végezték binokulárisan, egy sötétített szobában, ahol csak a tesztet megjelenítő monitor volt látható. A tesztábrakon $5 \pm 3 \text{ cd/m}^2$ fényssűrűségű biztositotta, hogy csak színelkülönbség legyen észlelhető, világosságkülönbség ne.

A kísérleti terv illeszkedik a korábbi kutatásához [22]: a (0.2024; 0.4689) koordinátájú színpont volt a semleges pontként definiálva, a referenciapontokat ettől a ponttól távolítottuk 8 egyenlően elosztott irány mentén.

A kísérleti tervben az alábbi definíciókkal éltünk: a referenciairány a semleges pontból a referenciapont felé mutató irány (jelölése: δ); a mérési irány az az irány, amely mentén a referenciaponthoz képest a felismerendő Landolt C ábra színezete változik; valamint ϑ jelöli az ellipszisek nagytengelyének irányát. Az irányok minden esetben az u' abszcisszatengelyhez képest értendők.

A referenciairányokat (k) formában jelöljük, ahol $k = \delta / (\pi/4)$. A referenciapontokat a referenciairányok mentén, referenciátávolságok függvényében jelöljük. A referenciátávolság a **3. ábra** jobb alsó sarkában látható nyílak mentén növekszik úgy, hogy a semleges pont minden referenciairány mentén a 0 értéket kapja. Egysége: $\Delta E_{u'v'} = 0.027$. A **3. ábra** jelöli a (3) referenciairány mentén a -5,(3), valamint a 3,(3) referenciapontokat.

Míg a korábbi Trivector-teszteket egyenközű lépésekkel, összesen 66 db referenciapontban, az ellipsziszteszteket ugyanazon referenciapontok közül összesen 23 db pontban végeztük el. A referenciapontokat a 3. ábra mutatja.

3. Eredmények és kiértékelés

Az ellipsziszteszteket 8 db mérési iránnyal végeztük. Ugyan a CCT minden egyes mérés eredményeképp megadja egy, a mért küszöbértékekre illesztett ellipszis paramétereit, a kiértékelés során a referenciapontonként mért küszöbértékek átlagértékeire legkisebb négyzetek módszerével illesztett ellipsziseket vizsgáltuk. Az eredményül kapott színdiszkriminációs ellipsziseket a 4. ábra mutatja. Az ellipszisek 3-szoros nagyítással szerepelnek az ábrán.

A Trivector-tesztek részletes kiértékelése a szerzők korábbi publikációjában olvasható [22]. A jelen kutatásban használt eredmény a konfúzi-

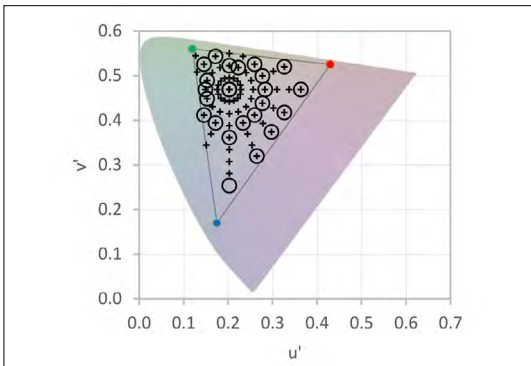
ós irányok felé mért küszöbértékek (Δ) másodfokú polinomokkal történő becslése a referenciairány és a referenciátávolság függvényében (1), (2) és az 1. táblázat alapján, ahol x a referenciátávolság.

$$\Delta_{P,D,T} = c_2 \cdot x^2 + c_0 \tag{1}$$

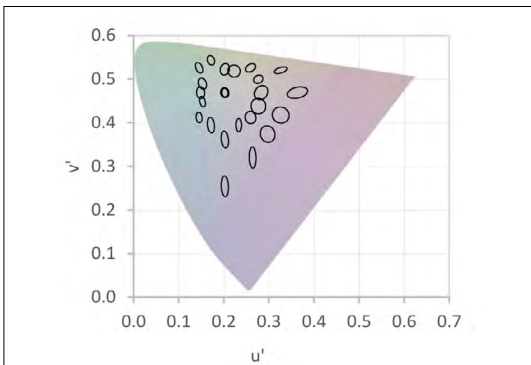
$$c_2(\delta) = \sqrt{\frac{a^2 \cdot b^2}{a^2 \cdot \sin^2(\delta - \vartheta) + b^2 \cdot \cos^2(\delta - \vartheta)}} \tag{2}$$

1. táblázat. Az (1) és (2) egyenlet paraméterei [22]

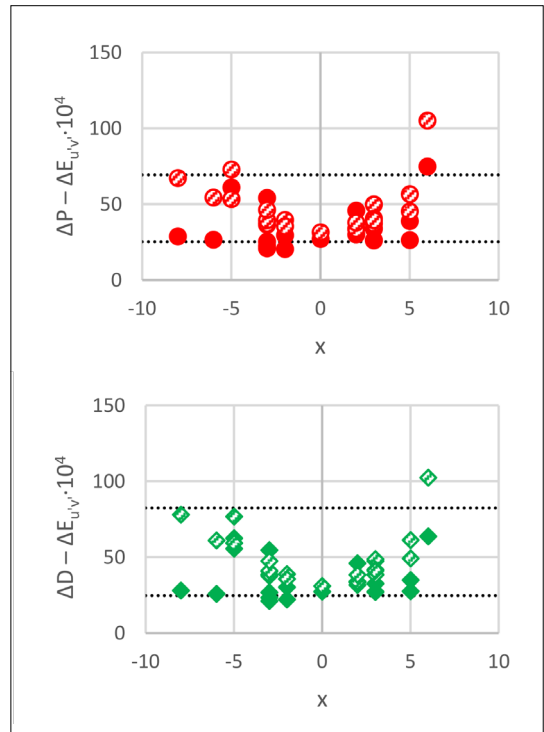
	Protan	Deutan	Tritan
a	2.3810	2.1872	4.6203
b	0.5549	0.7265	0.5507
ϑ	171.84°	170.62°	95.57°
c_0	31.4695	31.0190	50.2427



3. ábra. Referenciairányok, valamint a referenciapontok a Trivector-tesztek (+), illetve az ellipszisztesztek (o) esetében a CIE 1976 UCS színdiagramban.



4. ábra. Színdiszkriminációs ellipszisek a CIE 1976 UCS színdiagramban. Az ellipszisek 3-szoros nagyítással szerepelnek az ábrán.



5. ábra. Protan- (fent) és deutan- (lent) konfúzióirány mentén becsült színdiszkriminációs küszöbértékek (ΔP és ΔD) a Trivector- (sraffozott) és az ellipszis- (kitöltött) tesztek eredményei alapján, a referenciátávolság függvényében. A szaggatott vonalak a küszöbértékeknek a szakirodalomban publikált várható terjedelmét jelzik.

A konfúziós irányokban a Trivector-mérések alapján meghatározott (1) és (2) egyenletek és az **1. táblázat** alapján becsült küszöbértékeket és az ellipsziszteszt eredményeképp kapott ellipszisek megfelelő irányú sugarait az **5. ábra** és a **6. ábra** mutatja. Az ábrákon a sraffozott pontok a Trivector, a kitöltött pontok az ellipsziseredményeket jelölik rendre a protan (●), deutan (◆) és a tritan (▲) konfúziós irány esetében. Mindhárom grafikonon az abszcissza a referenciátávolság, az ordináta pedig a küszöbérték.

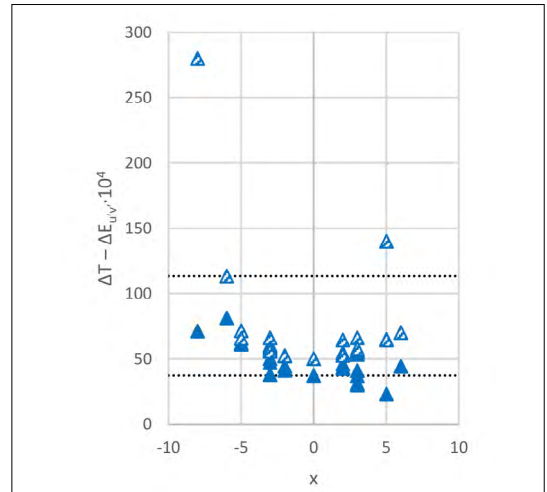
Az ellipszisek nagytengelyének iránya erős, lineáris korrelációt mutat a referenciáiránynyal (Spearman-korrelációs együttható: 0.82; $p = 1.73 \cdot 10^{-6}$, ld. **7. ábra**), tehát a színdiszkriminációs képesség jellemzően a mérések referenciaszínei mentén romlott.

4. Összegzés, konklúzió

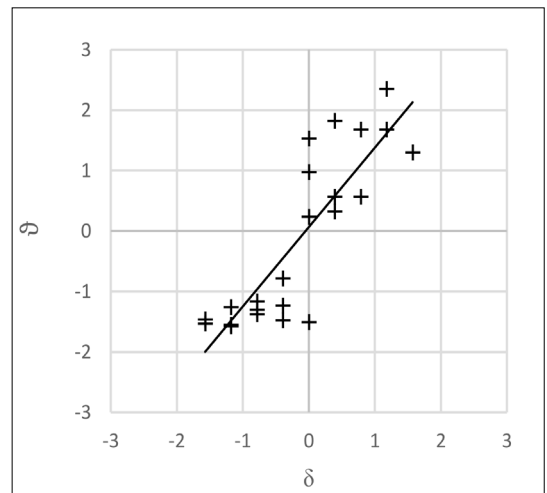
Az **5. ábra** és a **6. ábra** illusztrálja, hogy a protan-, illetve deutan-konfúziósirányokban mért küszöbértékek hasonló és a tritanértékektől eltérő eloszlást mutatnak mindkét metrika szerint. Mindhárom konfúziós irány esetében láthatóak olyan küszöbértékek, amelyek meghaladják a normál színlátók küszöbértékének felső határát.

A **7. ábra** és a hozzákapcsolódó korrelációvizsgálat azt mutatja, hogy az ellipszisek megnyúlásának irányára erős hatással van az, hogy a referenciapont milyen irányban van eltolva a semleges színponthoz képest az 1976 UCS diagramon. Mindemellett maguk az ellipszisek (ld **4. ábra**) azt mutatják, hogy az ellipszisek a protan- és a tritan-konfúziós pont felé nyúltak, viszont a deutan-konfúziós pont irányában nem tapasztaltunk ilyesmit. Ennek oka lehet, hogy a monitor gamutja a semleges ponttól a deutan-konfúziósirány felé lényegesen szűkebb megjeleníthető színtartományt foglal magában, emiatt a deutan-irányban kevesebb referenciapontot is tudtunk megjeleníteni, és a megvalósult mérések esetén is kisebb tartományon változhatott a pseudoizokromatikus ábra mintaszíne. Ennek a hatásnak a vizsgálatára további mérések elvégzése szükséges, egy bővebb gamuttal rendelkező kijelzővel.

Az **5. ábra** és a **6. ábra** grafikonjai alapján megállapítható, hogy a Trivector-bebecslések szinte minden esetben meghaladják az azonos referenciapontban felvett ellipszisz mérés alapján becsült küszöbértéket, tehát a becsült színdiszkriminációs ellipsziseken kívül is voltak olyan színek, amelyeket a megfigyelők nem tudtak megkülönböztetni.



6. ábra. Tritan-konfúziósirány mentén becsült színdiszkriminációs küszöbértékek (ΔT) a Trivector- (sraffozott) és az ellipszisz- (kitöltött) tesztek eredményei alapján, a referenciátávolság függvényében. A szaggatott vonalak a küszöbértékeknek a szakirodalomban publikált várható terjedelmét jelzik.



7. ábra. Az ellipszisek nagytengelyének iránya (θ) a referenciáirányok (δ) függvényében.

Ez arra enged következtetni, hogy az ellipsziszteszt megbízhatósága függ attól, hogy a 360°-ot egyenlően felosztó mérési irányok valamelyike(i) egybeesnek-e vagy megközelítik-e valamelyik konfúziós irányt. Ennek kiküszöbölésére ajánlott a kísérleti terv elkészítésekor a konfúziós irányoknak kiemelt szerepet biztosítani épszínlátó személyek vizsgálata esetében is.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] B. L. Cole: *Assessment of Inherited Colour Vision Defects in Clinical Practice*. Clin. Exp. Optom., 90/3. (2007)157–175.
- [2] M. Gualtieri, C. Feitosa-Santana, M. Lago, M. Nishi, D. F. Ventura: *Early Visual Changes in Diabetic Patients with No Retinopathy, Measured by Color Discrimination and Electroretinography*. Psychol. Neurosci. 6/2. (2013) 227–234.
- [3] D. F. Ventura et al.: *Colour Vision and Contrast Sensitivity Losses of Mercury Intoxicated Industry Workers in Brazil*. Environ. Toxicol. Pharmacol., 19/3, (2005) 523–529.
- [4] D. F. Ventura et al.: *Color Vision Loss in Patients Treated with Chloroquine*. Arq. Bras. Oftalmol., 66/5. SUPPL.(2003) 9–15.
- [5] G. V Paramei, B. Oakley: *Variation of Color Discrimination across the Life Span*. J. Opt. Soc. Am. A Opt. Image Sci. Vis., 31/4, (2014) A375–A384.
- [6] S. Wen: *A Color Difference Metric Based on the Chromaticity Discrimination Ellipses*. Opt. Express, 20/24. (2012) 26441.
- [7] D. L. MacAdam: *Uniform Color Scales*. J Opt Soc Am, 64/12, (1974)1691–1702.
- [8] Q. Xu, B. Zhao, G. Cui, and M. R. Luo: *Testing Uniform Colour Spaces Using Colour Differences of a Wide Colour Gamut*. Opt. Express, 29/5. (2021) 7778.
- [9] S. J. Dain: *Clinical Colour Vision Tests*. Clin. Exp. Optom., 87/4–5. (2004) 276–293.
- [10] N. Hasrod, A. Rubin: *Colour Vision: A Review of the Cambridge Colour Test and Other Colour Testing Methods*. African Vis. Eye Heal., 74/1. (2015) 1–7.
- [11] M. R. Pointer, G. G. Attridge: *Some Aspects of the Visual Scaling of Large Colour Differences*. Color Res. Appl., 22/5. (1997) 298–307.
- [12] S. Abasi, M. Amani Tehran, M. D. Fairchild: *Distance Metrics for Very Large Color Differences*. Color Res. Appl., 45/2. (2020) 208–223.
- [13] D. L. MacAdam: *Visual Sensitivities to Color Differences in Daylight*. J. Opt. Soc. Am., 32,/5. (1942) 247–274.
- [14] ISO 8586:2012 *Sensory Analysis — General Guidelines for the Selection, Training and Monitoring of Selected Assessors and Expert Sensory Assessors*. 2012. 28.
- [15] S. Ishihara: *Tests for Color Blindness*. Tokyo, Kyoto: Kanehara Shuppan Co. Ltd., 1972.
- [16] B. C. Regan, J. P. Reffin, J. D. Mollon: *Luminance Noise and the Rapid-Determination of Discrimination Ellipses in Color Deficiency*. Vision Res., 34/10. (1994) 1279–1299.
- [17] J. D. Mollon, B. C. Regan: *Handbook of the Cambridge Colour Test*. London, UK, 2000.
- [18] B. C. Regan, J. D. Mollon: *Discrimination Ellipses in the MacLeod-Boynton Diagram: Results for Normal and Colour-deficient Subjects Obtained with a CRT Display*. Drum, B. Colour Vis. Defic., XII. (1995) 445–451.
- [19] D. F. Ventura et al.: *Preliminary Norms for the Cambridge Colour Test*. In: J. D. Mollon, J. Pokorny, K. Knoblauch: *Normal and Defective Colour Vision*, Eds. Oxford, 2010.
- [20] G. V. Paramei: *Color Discrimination across Four Life Decades Assessed by the Cambridge Colour Test*. J. Opt. Soc. Am. A, 29/2. (2012) A290.
- [21] M. F. Costa, D. F. Ventura, F. Perazzolo, M. Murakoshi, L. C. D. L. Silveira: *Absence of Binocular Summation, Eye Dominance, and Learning Effects in Color Discrimination*. Vis. Neurosci., 23/3–4. (2006) 461–469.
- [22] Á. Urbin, B. V. Nagy: *Chromatic Discrimination Thresholds as a Function of Color Differences and Cone Excitations*. Period. Polytech. Mech. Eng., 65/4. (2021) 385–397.