

Sávoli Zsolt

Digitális színes minták spektrális
rekonstrukciója főkomponens-analízissel és
genetikus optimalizációval

Doktori tézisek

Dr. Horváth András, Fizika és Kémia Tanszék, Széchenyi István
Egyetem, Győr

Dr. Kránicz Balázs, Continental Automotive Hungary, Veszprém

Infrastrukturális Rendszerek Modellezése és Fejlesztése
Multidiszciplináris Műszaki Tudományi Doktori Iskola

Napjainkban ugrásszerűen növekszik a digitális képalkotásra alkalmas berendezések száma. Mindenki számára elérhetőek a digitális fényképezőgépek, kamerák, de olcsóbb mobiltelefonjainkban is olyan kamerák vannak, nem ritkán több is, melyek még 10 évvel ezelőtt is csúcstechnikának számítottak volna. Ezek elterjedését nem a tudományos, műszaki célok hajtották, hanem a hétköznapi felhasználás: családi fotók készítése, egy-egy érdekes utcai esemény rögzítése, videotelefonálás stb. Ez a motiváció a tömegtermelés miatt olcsóvá tette a digitális képalkotó berendezéseket, és ezzel párhuzamosan az ezek feldolgozására alkalmas szerkezetek kapacitása is hihetetlenül megnőtt. Ezek az eszközök gyakran nem is „számítógépek” a szó hagyományos értelmében, hanem valamilyen célhardverek, például egy mobiltelefon. Így a mai könnyen beszerezhető eszközök olyan képességekkel bírnak, melyekhez hasonló 20 évvel ezelőtt csak a speciális laboratóriumokban volt elérhető.

Kicsit hasonló a helyzet ahhoz, mint 10-15 éve a grafikus processzorok (GPU - Graphics processing unit) esetén volt: ezek fejlődését a 3D¹-játékok indították és hajtották, de kiderült, hogy tudományos számításokra, titkosításfeltörésre és sok egyébre is felhasználható a bennük rejlő potenciál. Mára már sokféle alkalmazás (pl. web-böngészők) is törekszik arra, hogy amit lehet, a grafikus processzorokra terheljen, kímélve ezzel a központi vezérlőegységet, a CPU-t (CPU - Central processing unit), de tudományos célú számítógép-fürtök is épültek az eredetileg az élethű megjelenítést nyújtó 3D-játékok érdekében kifejlesztett hardverre alapozva. Alapötletünk az, hogy a digitális képalkotó eszközök képeit alaposabb elemzésnek alávétve sok olyan információ rejtve marad, mely a hétköznapi életben vagy speciális alkalmazási körben érdekes lehet, és amely információk korábban csak költséges és nehezen kezelhető céleszközökkel voltak elérhetőek. Célul tűztük ki egy olyan eljárás kifejlesztését, amelynek segítségével ezen rejtett információk egyike (spektrális adatok) kinyerhető a digitális képekből, az eddigi módszereknél

¹ A 3D kifejezés az informatikában használatos. Ezek a játékok valójában nem háromdimenziósak, általában még nem is keltenek térhatást. Csupán arról van szó, hogy nagyon jól leképzik a virtuális teret a megjelenítés síkjára.

egyszerűbben és pontosabban, speciális céleszközök nélkül. Az nyilvánvaló, hogy egy mobiltelefonnal, digitális fényképezőgéppel nem fogunk pontosság terén versenyre kelni egy e célból épített spektrofotométerrel, de elméleti és kísérleti vizsgálatainkra alapozott állításunk az, hogy sok alkalmazás szempontjából elegendő pontosságú lehet az olcsó képalkotó eszközök használata, ha képeiket alapos elemzésnek vetjük alá.

A szintan alaptézisének tekinthető az a megállapítás, hogy bármely színinger egyértelműen jellemezhető három számmal. Lehetnek ezek a *CIE XYZ* színinger-összetevők vagy bármely más, alkalmas színtér koordinátái (*RGB, Yxy, L*a*b*, L*u*v** stb.), amelyek egymásba alakítása viszonylag egyszerűen elvégezhető. Önvilágítók (fényforrások) vagy felületek (másodlagos fényforrások) jellemzése azonban sokszor színeképi tulajdonságokkal, azaz a spektrummal, reflexiós függvénnyel történik. Egy színminta, egy felületdarab teljes szintani leírását a színeképe adja meg, mert ez minden hullámhosszon információt hordoz a kibocsátott vagy visszavert fény által szállított energiáról. Ez a jellemzőmód nagyságrendekkel több információt nyújt a vizsgált objektumról, ennek következtében viszont háromnál jóval több paramétert igényel. A digitális képek készítésekor ez a sok információ csak 3 színesatornára, az *RGB*-értékekre (Red, Green, Blue) redukálódik. Az *RGB*-értékekből visszanyerni a színeképet teljes pontossággal nem lehetséges, hisz adott *RGB* hármashoz végtelen sok spektrum tartozik. Adott megvilágító alatt egy-egy mintát akkor is azonos színűnek láthatunk, ha azok spektruma eltérő. Ezeket metamer pároknak nevezzük.

A szintan kutatói vizsgálni kezdték, hogy milyen módszerekkel adható meg vagy legalább közelíthető például felületek visszaverési spektruma csupán néhány számértékkel. Különlegesen érdekes és erős eszköznek ígérkezett a matematikai statisztikán és a lineáris algebraán átívelő főkomponens-analízis (Principal Component Analysis – PCA).

A főkomponens-analízis betanító, színes mintahalmazok reflexiós függvényeiből képzett kovariancia mátrix sajátvektorainak lineáris kombinációjával állítja elő a

spektrumot, felhasználva a mintahalmaz elemeiből képzett átlagvektort. A lineáris kombinációban szereplő együtthatók a főkomponensek. A főkomponens-analízist használva számos tanulmány foglalkozott ismert reflexiós függvényű minták spektrális rekonstrukciójával. Ezen kutatásokból levonható a megállapítás: a rekonstrukciónál használt sajátvektorok számának növelése jelentősen megnöveli a rekonstrukció pontosságát. Felvetődik a kérdés, hogy lehet-e ismeretlen reflexiós függvényű színminták spektrumáról valamit mondani pusztán a színinger-összetevők alapján. A színinger-összetevő értékeiből való rekonstrukcióra irányuló kutatások egyik leggyakrabban alkalmazott módszere a már említett főkomponens-analízis. Mivel a színinger-összetevők mátrixa háromelemű, ezért *egy* adott megvilágító esetén csak az első három sajátvektorhoz tartozó főkomponensek határozhatók meg numerikus módszerekkel, ami azt eredményezi, hogy a spektrum rekonstrukciójához csupán az első három sajátvektort használhatjuk fel a főkomponens-analízis lineáris kombinációjában. Így azonban semmi sem garantálja azt, hogy a kapott metamer spektruma meg fog felelni valós minták reflexiós reflexiós függvényeinek. Az így nyert spektrum színi egyezése jó lesz ugyan, de a spektrális pontosságot az határozza meg, hogy a használt numerikus megoldás milyen eredményeket szolgáltat. A rekonstrukció pontosságának javítása érdekében több különböző módszert alkalmaztak: adaptív PCA, progresszív mintaválogatás, súlyozott főkomponens-analízis. Ezen módszerek javítottak ugyan a rekonstrukció pontosságán, de minden egyes rekonstrukcióhoz szükség volt a betanító mintahalmaz elemeire is. Ezen eljárások mindegyike továbbra is csak az első három sajátvektort használhatta a rekonstrukció során. Azáltal is javítható a rekonstrukció pontossága, ha adott színminta esetén nem egy, hanem több különböző megvilágító használunk. Ezáltal természetesen nőni fog az egyenletek száma, tehát több sajátvektor vonható be a rekonstrukcióba. Két megvilágító esetén a felhasználható sajátvektorok száma háromról hatra terjeszthető ki. Több megvilágító használata azonban jelentősen bonyolítja az eljárást.

A rekonstrukció pontosságán úgy lehetne az eddigiekhez képest *számottevően* javítani, ha további sajátvektorokat vonnánk be a lineáris kombinációba. Az eddigi numerikus módszerekkel azonban ez nem lehetséges.

A kutatás célja egy olyan eljárás kidolgozása volt, amely az eddigi módszerektől eltérően nem csak az első három, hanem az első öt sajátvektort használja fel a rekonstrukció során, növelve annak pontosságát. Mindezt sikerült úgy elérni, hogy a korábbi kutatásokkal ellentétben egy rekonstrukció során csak egy megvilágító került felhasználásra, valamint nem használtuk fel a betanító mintahalmaz elemeit, csupán a belőlük képzett sajátvektorokat, valamint az átlagvektort. A kutatás további célja volt annak vizsgálata is, hogy miként lehet a rekonstrukciót végrehajtani kis számítási kapacitással rendelkező eszközök esetén, hogyan függ a rekonstruált spektrum a betanító mintahalmaz anyagi minőségétől, milyen hatása van a megvilágítóknak a spektrális rekonstrukcióra, illetve hogyan lehet végrehajtani a rekonstrukciót, ha nem ismerjük a megvilágító spektrális teljesítményeloszlását.

A kutatás során több ezer lemért, ismert színmitát használtunk fel: 373 Munsell-minta, 2832 textilminta, 148 virágminta, 565 festékminta valamint 8533 emberi bőrminta. A minták rekonstrukciója során a következő megvilágítókat tételeztük fel: CIE D65, CIE D50, CIE A, E, CIE F11, 5000K korrelált színhőmérsékletű fényporos illetve háromsávós fehér LED, 6504K korrelált színhőmérsékletű fényporos illetve háromsávós fehér LED, valamint Planck-sugárzók különböző színhőmérsékletekkel (6504K, 5454K, 5003K, 5000K, 4000K). Ezen megvilágítókat feltételezve történt a betanító minták rekonstrukciója. A rekonstrukciók során az eddigiekkel ellentétben az első három sajátvektor helyett az első öt sajátvektort használtuk. Ezen sajátvektorok lineáris kombinációjához szükséges együtthatókat, a főkomponenseket a korábbi numerikus módszerek helyett optimalizációval határoztuk meg, kiegészítve valós színminták reflexiós függvényeinek megfelelő korlátozó feltételekkel. Az optimalizációhoz először az Excel program Solver kiegészítőjét használtuk. A későbbiekben a Solver helyett saját genetikusan optimalizáló algoritmussal történ a rekonstrukció, ami több szempontból is indokolt

volt. Egyrészt jobban lehetett paraméterezni az optimalizációt, ezáltal javult annak pontossága, másrészt elérhetővé vált a folyamat automatizálása, így kis számítási kapacitással rendelkező eszközök számára is lehetővé vált a rekonstrukció.

Tézisek

1. Tézis. Disszertáció 5.1.3, 5.2.2 fejezetek

A szintér felosztása esetén jobb rekonstrukciós eredményeket kapunk, a mintához tartozó tartományok sajátvektorai alapján [1].

Az 1. táblázat Munsell-minták rekonstrukciós eredményeinek átlagát mutatja osztott szintér és teljes szintér esetében.

1. táblázat. Munsell-minták rekonstrukciójának átlagos értékei.

osztott szintér				teljes szintér			
RMS	wRMS	GFC	ΔE_{ab}^*	RMS	wRMS	GFC	ΔE_{ab}^*
0,0188	0,0127	0,999	1,5E-04	0,0294	0,0229	0,9972	3,26E-04

2. Tézis. Disszertáció 6.1, 6.2, 6.3, 6.4 fejezetek

Ismeretlen reflexiós függvényű, ismert színinger-összetevőkkel ($X_0Y_0Z_0$) rendelkező színminta spektrális rekonstrukciója a főkomponens-analízis első sajátvektorával jobb spektrális eredményeket szolgáltat, mint az eddig használt három sajátvektoros rekonstrukció. A sajátvektorok főkomponensei (τ_i) genetikusan optimalizációval határozhatók meg [2] - [4].

Az öt sajátvektoros rekonstrukció *RMS* értékének százalékos javulása a három sajátvektoroshoz képest 39,21%, a *GFC* értékének javulása 1,32%.

A genetikus optimalizáció költségfüggvénye a következő alakba írható:

$$d(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_5) = (X_0 - X)^2 + (Y_0 - Y)^2 + (Z_0 - Z)^2 + P_n + P_v.$$

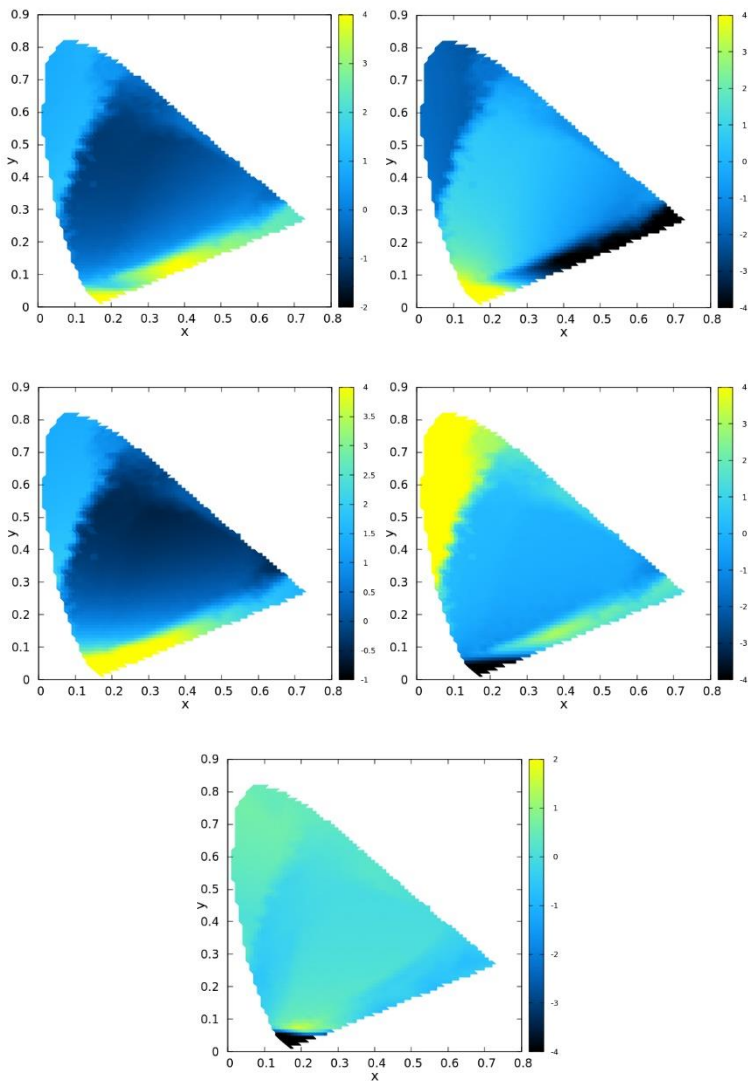
Az egyenletben szereplő XYZ színinger-összetevők a rekonstruált minta egy metamerének értékei. Az elvileg végtelen sok metamerből a valós színminták alakjára vonatkozó korlátozó feltételek segítségével válogat az algoritmus. A valós minták reflexiós függvényei nem vesznek fel negatív értékeket, és mentesek a nagyobb oszcillációtól. A negativitásra vonatkozó korlátot a P_n , a simaságra vonatkozó feltételt a P_v tag veszi figyelembe a költségfüggvényben.

3. Tézis. Disszertáció 6.5 fejezet

Színes minták spektrális rekonstrukciója a főkomponens-analízist használva optimalizációval elvégezhető kis számítási kapacitással rendelkező eszközök esetén is, amennyiben a rekonstrukció lineáris kombinációjában szereplő főkomponenseket a $CIE xy$ sík kellően sűrű rácsközzel felosztott színességi koordinátáihoz előre meghatározzuk és megfelelő look-up table formában tároljuk [2] - [4] (1. ábra).

Így később egy adott minta színinger-összetevőiből számított xy színességi koordinátáknak megfelelő főkomponenseket elég a letárolt táblázatokból kiolvasni, szükségtelen az optimalizációt újból lefuttatni. Mivel az xy színességi koordináták által meghatározott síkidomban a világosságra vonatkozó Y információk eltűnnek, ezért az xyY szintérben ábrázolható valós színminták térbeli színkészlete, gamutja alapján $Y'_0 = 18,42$ értékkel dolgoztunk. Ez az Y'_0 érték azonos az $L^* = 50$ világossági tényezővel mind a $CIELAB$, mind a $CIELUV$ szintérben. Ezekben a szinterekben pedig a valós mintákat reprezentáló szintest ennél az értéknél a legnagyobb átmérőjű. Igaz ugyan, hogy így nem az eredeti $X_0Y_0Z_0$ értékekhez kapjuk meg a τ_i főkomponenseket, de az ezen együtthatókkal elvégzett lineáris kombináció eredményeként megkapott reflexiós függvényt az $\frac{Y_0}{Y'_0}$ értékkel

megszorozva, skálázva jól közelítve megkapjuk az eredeti $X_0Y_0Z_0$ színinger-összetevőkhöz tartozó spektrumot.

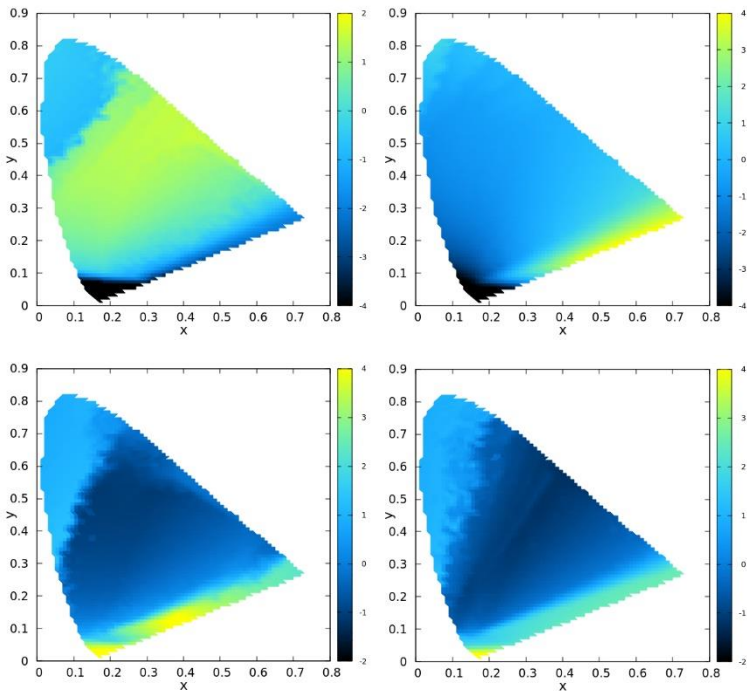


1. ábra. Look Up Table színekódoltan, amely a textilminták τ_1 – τ_5 főkomponenseit tartalmazza

4. Tézis. Disszertáció 6.7 fejezet

Különböző anyagok esetén még ugyanahhoz a színinger-összetevő értékekhez is eltérő spektrum tartozik [5].

A vizsgálathoz textilminták, festékminták, virágminták és bőrminták reflexiós függvényei, XYZ színinger-összetevői lettek felhasználva. A textilminták, illetve festékminták jelentősebb osszillációktól mentes rekonstruált reflexiós függvényei hasonlítanak leginkább egymásra, de ezek sem egyeznek meg teljesen. Ezen eltérések magyarázhatók a mintahalmazokból képzett kovariancia mátrixok sajátvektorainak különbözőségével. A 2. ábrán a különböző mintahalmazok τ_1 , első főkomponenseinek Look Up Table színekódolt képei láthatók.



2. ábra. Bőr, festék, textil, virág mintáinak τ_1 főkomponensei.

5. Tézis. Disszertáció 6.8.1 fejezet

A genetikus optimalizációval végzett spektrális rekonstrukció hasonlóan jó eredményeket szolgáltat különböző minták esetén más-más ismert spektrális teljesítményeloszlású megvilágítót feltételezve [6].

Ez azt jelenti, hogy a módszer alkalmazható különböző ismert spektrális tulajdonságú megvilágítóval, a rekonstrukció hatékonysága nem fog függeni a megvilágító típusától (2. táblázat).

2. táblázat. A rekonstrukció átlagos értékei különböző megvilágítók esetén.

	RMS	wRMS	GFC	ΔE_{ab}^*
E	0,0300	0,0162	0,9926	0,0100
CIE D65	0,0307	0,0158	0,9918	0,0105
CIE A	0,0316	0,0179	0,9914	0,0134
CIE F11	0,0316	0,0179	0,9914	0,0134
CIE D50	0,0294	0,0163	0,9914	0,0133
LED 1	0,0312	0,0166	0,9915	0,0135
LED 2	0,0300	0,0172	0,9919	0,0137

6. Tézis. Disszertáció 6.8.2, 6.8.3, 6.8.4 fejezetek

6.a Tézis.

Ismeretlen spektrális teljesítményeloszlású, de ismert fehérpontú, ismert korrelált színhőmérsékletű megvilágító esetén jól működik a rekonstrukció, olyan megvilágítót feltételezve, amelyik korrelált színhőmérséklete megegyezik az eredeti, ismeretlen spektrális teljesítményeloszlású megvilágító korrelált színhőmérsékletével [6] (3. táblázat).

3. táblázat. A rekonstrukció átlagos értékei azonos korrelált színhőmérsékletű megvilágítóval helyettesítve.

RMS	wRMS	GFC	ΔE_{ab}^*
0,0389	0,9921	0,0069	0,0285

6.b Tézis.

Ismeretlen spektrális összetételű megvilágítót lehet helyettesíteni a spektrális rekonstrukció során vele azonos színhőmérsékletű Planck-sugárzóval (4. táblázat).

4. táblázat. A rekonstrukció átlagos értékei Planck-sugárzóval helyettesítve.

RMS	wRMS	GFC	ΔE_{ab}^*
0,0404	0,0278	0,9940	0,0056

A rekonstrukció során szükségessé vált a *CIE XYZ* rendszerről áttérni a *CIELAB* szintérrre, mert ez utóbbi formuláiban figyelembe veszi a fehéradaptációt. Így az optimalizáció költségfüggvénye módosult:

$$d(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_5) = (L_0^* - L^*)^2 + (a_0^* - a^*)^2 + (b_0^* - b^*)^2 + P_n + P_v.$$

A költségfüggvényben szereplő L_0^* , a_0^* , b_0^* , L^* , a^* , b^* az eredeti illetve a rekonstruált reflexiós függvényekből számolt értékek, a P_n , P_v hasonló jelentéssel bírnak, mint az eredeti költségfüggvény esetén, vagyis a negativitást és a simaságot veszik figyelembe.

7. Tézis

Ismert csatornaérzékenyséjú digitális kamera alkalmazható spektrális információk meghatározására. Színes minta reflexiós függvényének előállítására a kamera RGB értékeiből történik a főkomponens-analízis által szolgáltatott első öt sajátvektor és az optimalizációval megkapott főkomponensek segítségével (5. táblázat).

5. táblázat. Digitális kamera által meghatározott reflexiós függvények átlagos rekonstrukciós értékei.

RMS	wRMS	GFC	ΔE_{ab}^*
0,0239	0,0182	0,9969	1,0616

Összegzés

A kutatás során bebizonyosodott, hogy az eddigi munkáktól eltérően, amelyek ismeretlen reflexiós függvényű színes minták spektrális rekonstrukciójára irányultak, a főkomponens-analízis első három sajátvektora mellett további kettő is bevonható a rekonstrukciós eljárásba, növelve annak pontosságát. Ehhez szükséges, hogy figyelembe vegyünk valós minták reflexiós függvényeinek alakját, amelyek nem vehetnek fel negatív értékeket, és mentesek a nagyobb oszcillációktól. A genetikus optimalizációval nyert főkomponensek, amelyek szükségesek a rekonstrukcióhoz, előre meghatározhatók, eltávolíthatók, így később olyan eszközök esetében is lehetséges a spektrális rekonstrukció, amelyek számítási kapacitás hiányában alkalmatlanok az optimalizáció rövid idő alatti lefuttatásához. A vizsgálatok igazolták, hogy a különböző anyagi minőségű mintákhoz más-más reflexiós függvény tartozik még azonos színínges-összetevők esetén is. A kutatás során kiderült, hogy ismert spektrális összetételű megvilágítókat feltételezve a spektrális rekonstrukció hasonlóan jó hatásfokkal működik a különböző megvilágítókat esetén. Ismeretlen spektrális teljesítményeloszlású megvilágító pedig

helyettesíthető a rekonstrukció során vele azonos korrelált színhőmérsékletű megvilágítóval, például azonos színhőmérsékletű Planck-sugárzóval.

Irodalomjegyzék

- [1] Kránicz B, Sávoli Zs, Hanák B.: *Optimization of the Spectral Content of LED-Sources and Spectral Reconstruction Using a Large Sample Database and Principal Component Analysis, Proceedings of LUX Europa Krakow, (2013), pp. 569-574.*
- [2] Sávoli Zs., Horváth A., Kránicz B.: *Színminta-halmazhoz illeszkedő, jó kvalitatív tulajdonságú metamer gyors keresése, Képfeldolgozók és Alakfelismerők Társaságának 10. országos konferenciája, Kecskemét (2015), pp. 722–737.*
- [3] Б. Кранич (B. Kránicz), Ж. Саволи (Zs. Sávoli), А. Хорват (A. Horváth): *Реконструкция спектра по координата цвета методами анализа главных компонентов и генетической оптимизации (Spectral Reconstruction from Tristimulus Values with the Use of Principal Component Analysis and Genetic Optimization), Светотехника, Москва, No. 3 (2016), pp. 35-42.*
- [4] Horváth A., Sávoli Zs., Kránicz B.: *Spectral Reconstruction from Tristimulus Values with the Use of Principal Component Analysis and Genetic Optimization, Light & Engineering, Vol. 25, No. 1 (2017), pp. 96-105.*
- [5] Sávoli Zs., Horváth A., Kránicz B.: *Spectral Reconstruction with Genetic Optimization in case of Different Sample Sets, Acta Technica Jaurinensis, Széchenyi István Egyetem, Vol. 9, No. 1 (2016), pp. 54-64.*
- [6] Sávoli Zs., Kránicz B., Horváth A.: *Spectral Reconstruction in case of Different Illuminants, Annals of Faculty Engineering Hunedoara - International Journal of Engineering, University Politehnica Timisoara, Vol. 14.1 (2016), pp. 45-54.*

- [7] *Sávoli Zs., Kráncz B., Horváth A.: Spectral Reconstruction on the Basis of Several Samples and Principal Components Analysis, Acta Technica Jaurinensis, Széchenyi István Egyetem, Vol. 6, No. 4 (2013), pp. 79-85.*
- [8] *Horváth A. , Kráncz B., Sávoli Zs., Hencz Cs. I., Takács G.: Environmental Conditions Causing Change of Colour on the Packaging of Products, Acta Technica Jaurinensis, Széchenyi István Egyetem, Vol. 6, No. 4 (2013), pp. 31-39.*
- [9] *Kráncz B., Sávoli Zs.: Fénysűrűség mérése digitális fényképezőgéppel, Elektrotechnika, Budapest, 2014/02-04 (2014), pp. 10-11.*
- [10] *Horváth A., Sávoli Zs.: Measuring Colour Histogram Changes due to Solar Radiation, Proceedings of the XVth Lux et Color Vesprimiensis Symposium, (2016), pp. 44-50.*