

B í r á l a t

Dr. Kosztyán Zsolt Tibor

*Színi hiba csökkentése tristimulusos színínger mérő berendezések és számítógépes
bemeneti eszközök esetén*

Című Doktori (Ph.D.) értekezéséről

Bevezetés

A szerző egy aktuális, a digitális képalkotás területén mindennapos probléma megoldásának kutatását tűzte ki célul. Tudományos igényű dolgozathoz, Ph.D. munkához méltóan nemcsak a probléma egy lehetséges megoldását szeretne volna vázolni, hanem a probléma hátterét is meg akarta érteni, a „Miért pont így” kérdésre is választ akart adni.

A dolgozat a különféle digitális képalkotó és számítógépes bemeneti eszközök (szkennerek, digitális kamerák) színmegjelenítési pontosságát taglalja. A kép visszaadása, a színekpi illesztés ezen eszközökre csak véges pontossággal valósítható meg. Ez a hiba, miként a szerző a tartalmi kivonatban rámutat, különösen a keskeny sávú, LED-es és a gázkisülő lámpáknál lehet jelentős. Épp ezek a fényforrások azok, amelyek az izzólámpákhoz képesti jelentősen kisebb energiafogyasztásuk és hosszabb élettartamuk, nagyobb megbízhatóságuk miatt az élet minden területén, így a fent említett eszközök minden szegmensében szinte egyeduralkodóvá váltak. Szükségessé vált tehát az ezen fényforrásokat is magába foglaló kalibrációs és karakterizációs eljárások kidolgozása az említett színi hibák jellemzésére. A végső cél természetesen olyan eljárások kifejlesztése, amelyeknél a színi hibák mind az említett digitális képalkotó eszközök, mind pedig a tristimulusos színínger mérő berendezések esetében minimalizálható. A dolgozat tehát valós, a mindennapi életben előforduló problémát vet fel.

A dolgozat 4 fő részből áll: két tartalmi fejezetből, egy mellékletből és egy függelékből. A tartalmi fejezetek 107 oldal terjedelemmel bírnak, melyek kevesebb, mint a fele (43 oldal) az irodalmi áttekintést és az alapfogalmakat foglalja magába, és a több, mint 60 oldalnyi rész taglalja a szerző saját munkáját. A dolgozat felépítése így arányosnak mondható.

Az irodalmi áttekintést és az alapfogalmakat bemutató fejezet

Az első, irodalmi áttekintést bemutató és az alapfogalmat ismertető fejezet első alfejezete a színi hibák különböző definícióit mutatja be különböző színrendszerekben. Ennek fontos része az egyenközü színdiagrammok bemutatása. A témában kevésbé járatos olvasó részére a Szerző jól bevezeti a fogalom mibenlétét, néhány fontos fogalmat (például a színezeti szög, vagy a telítettség esetében) magyarázó ábrával tesz érthetővé. A különböző fogalmakat végig szabatosan és konzisztensen használja a dolgozatban.

A szerző ebben a fejezetben fogalmazza meg első munkahipotézisét, miszerint nemcsak az érzékelőcsatornák számának növelésével, hanem a csatornajelek optimális kombinációjával is csökkenthető a tristimulusos színmérők esetében taglalt színi hiba.

Az 1.3 fejezet és alfejezetei a képi információ felvételével foglalkoznak. Fontos, első olvasásra meglepő tényre hívja fel a figyelmet a szerző: megváltozhat egy szkennerek (vagy éppenséggel egy digitális fényképezőgép) megvilágítója. Ezt azt vonja maga után, hogy színezeti karakterizáció esetén a karakterizációt meg kell ismételni. Rámutat továbbá egy másik, reflexióval összefüggő hiányosságra is. Kulcskérdés tehát a minták helyes kiválasztása, ezért ilyen módszerek kidolgozását tűzi ki a szerző.

Nagyon fontos, tématerülettől függetlenül mindenki számára megszívlelendő dologra mutat rá a szerző az 1.3.2.1. fejezetben. A polinom regressziós algoritmusok esetében a polinom fokszáma javítja az illesztés jóságát, azonban ez a fokszám növelésével egyre inkább csak az a konkrétan mért pontok környezetére igaz (amit úgyis ismerünk), a mért pontok között az illesztett függvény hullámozhat. A szerző később bemutatja, hogy az oszcilláció nem feltétlen a polinomok fokszáma miatt van, hanem a regresszióelemzés alapfeltételeinek nem teljesülése is okozhatja. Ez egy újabb megszívlelendő megállapítás. Bármilyen analízis esetén meg kell vizsgálni az alkalmazás

teljesülési feltételeit, ellenkező esetben – bár maga az analízis elvégezhető – az eredmények értelmezése problémás lehet. A szerző a legmesszebbmenőkig eleget tesz ennek, a függelék 5.3 fejezetében kifejezett alapossággal taglalja a feltételeket és az értelmezés kérdését. (Később látni fogjuk, hogy saját módszerét összevetve más irodalmi módszerrel épp a feltételek teljesülése okozza a két módszer közötti eredményesség különbségét. Látni fogjuk azt is, hogy a szerző kimutatja, hogy az illesztés oszcillációja kiküszöbölhető a színes minták helyes kiválasztásával.)

A szerző saját kutatási eredményeit bemutató fejezet

A második, Színinger-mérési hiba csökkentése című fejezet tartalmazza a szerző saját kutatásának az eredményeit.

A fejezet három alfejezetet tartalmaz. Az első a Színinger-mérő berendezések színi hibáinak csökkentésével foglalkozik. Ebben a fejezetben három tézispontot fogalmaz meg a szerző. A második alfejezet a Szkenneres és digitális kamerák modellezésén alapuló, a detektor érzékenységét meghatározó módszerek osztályozása címet viseli. Ezen fejezet nem tartalmaz tézispontot. A harmadik fejezet a Síkágyas szkenneres és digitális kamerák karakterizációja címet viseli, e fejezethez kapcsolódik a szerző negyedik tézispontja.

A színinger-mérő berendezésekkel kapcsolatban a szerző azt az alapötletet vizsgálta, hogy a tristimulosos érzékelők négy csatornájának megfelelően megválasztott lineáris kombinációjával csökkenthető-e a az eszköz színi hája, illetve esetleges további csatornák beiktatása segít-e a hiba csökkentésén. Megvizsgálta, hogy hogyan hat e két lehetőség a jel/zaj viszonyra. A problémát mátrix alakban megfogalmazott egyenletek formájában definiálta, ezek a (2-1) – (2-9) egyenletek. Jobb illesztést, kisebb szisztematikus hibát azzal tud elérni, hogy egy adott adott fényforráscsoportot megmér a mérőműszerrel, a méréseket összeveti egy kalibrált vagy abszolút értéket adó méréssel, és a csoportra vonatkozó átlagos eltérést minimalizálja. A szerző újdonságnak számító ötlete a (2-9) egyenletben kerül megfogalmazásra, miszerint nem az x és y színkoordináták különbségeit csökkenti a lehető legkisebb értékre, hanem a $\Delta E_{ab}^*(C_s, C_T^S)$ értékeket. Választását, hogy miért a (leginkább) egyenközü CIELAB teret

választja ehhez, a bevezető fejezetben logikusan megindokolja. Az egyenletrendszer megoldásának matematikai meghatározását a szerző megadja, a konkrét megoldásként csak egy referenciára utal, noha a dolgozat későbbi részében többször is említésre kerül, hogy a problémára konkrét megoldást kínál. A (2-10) egyenletben az adott fényforráscsoport elemei között különbséget tesz azért, hogy az átlagos eltérés helyett súlyozza azokat, így egyes fényforrások nagyobb jelentőséggel bírnak másokhoz képest. Extrém esetben az egyik fényforrásnak 1, míg a többieknek 0 értéket ad. Köznapi nyelvre lefordítva ez azt jelenti, hogy csak ezt az egy fényforrást veszi figyelembe az optimalizációnál. Az olvasóban itt felmerül a kérdés, hogy miért van erre szükség, mi indokolja egyes fényforrások kitüntetett szerepét a többivel szemben. Erre választ csak a fejezet utolsó előtti mondata ad, miszerint ez akkor alkalmazandó, ha eszközünk egy adott fényforrás-csoport, extrém esetben csak egyfajta, például 450 nm-es kék LED mérésére akarjuk használni. (Magyarul ekkor a tristimulosos eszközt a CIE A fényforrássá helyett az adott fényforrásra kalibrálja).

Az új, illetve újabb csatornák hozzáadásához a szerző három feltételt definiál. E három feltétel mindegyikének hátterét, jelentőségét megindokolja. A függvény leírására a (talán magától értetődő) Gauss görbét választja. Megvizsgálja, hogy a Gauss görbével mennyire jól írhatók le az X, Y és Z függvények (a szerző harmadik feltétele), az egyezést megfelelőnek találja. A 18. ábra tanulsága szerint az egyezés – szemre – nem rossz, meg sem közelíti azonban az egyezést ezen függvények és a detektor szűrőzött jelei között. A szerző azonban mind elméleti (azaz a feladat matematikai-programozási-megoldási szempontok szerinti), mind pedig gyakorlati (ezt lehet megvalósítani valós interferenciás szűrők segítségével) aspektusból alátámasztja.

A fejezet egy későbbi részében a szerző a további csatornajelek hozzáadását taglalja. Bebizonyítja, hogy a további csatornák hozzáadása tovább csökkenti a hibát, a hiba csökkenésének mértéke azonban egyre kisebb. Könnyű lenne azt állítani, hogy arról van mindössze szó, hogy ha van egy alulról korlátos feladatom, miszerint a hibám maximum nulla lehet, akkor ahogy egyre jobban közelítem a célértékeimet, egyre kisebb hibákat kell és tudok már csak korrigálni, a további tagok hozzáadása tehát már csak egyre kisebb és kisebb korrekcióra van lehetőségük. Ennek azonban empirikus tapasztalatokon nyugvó ismertetését is tartalmazza a dolgozat, összeveti az emberi szem

átlagos színíngér különbség érzeti küszöbével és egy ezen alapuló általános eljárást mutat be egy adott mintaadtbázisra vonatkozó észlelő csatornák megfelelő számosságának meghatározására..

Az alfejezetet három tézispont megfogalmazása zárja. Az első a mátrixkorrelációs eljárást írja le, illetve hogy hogyan lehet tetszőleges számú észlelőcsatorna esetében az elméleti érzékenységi görbét meghatározni. A probléma mátrixkorrelációs felvetése – amelyre a szerző rá is mutat – nem most történik meg első alkalommal, de az egyenküü térben való színeltérés minimalizálása, az extra csatorna vagy csatornák kezelése mindenképp újdonság, a tézispont mindenképp elfogadható. (Kiemelendő itt, hogy a szerző utalt a korábbi munkákra és megadja ezek viszonyát az általa bemutatott eljárással és a módszer viszonyát a korábbi munkákhoz).

A második tézispontban elvégzi az optimalizálást egy adott fényforráscsopatra, meghatározza a 4 (vagy több) csatorna azon kombinációját ami az adott fényforráscsopatra a legkisebb hibát adja, így ezáltal a mérőberendezést az adott fényforráscsoport mérésére teszi hatékonyan alkalmassá. Ez a tézispont is újdonság, mindenképp elfogadható.

A harmadik tézispontnak a szerző szerinti erénye az, hogy egy adott, ismeretlen fényforrás esetében a korábban már lemért (az optimalizációhoz használt) fényforráscsoportból le tudja modellezni a fényforrás teljesítmény eloszlását. Ez a módszer különösen a színes LED-ekre, azaz vélhetően keskenysugárzókra igaz. Ugyancsak ezen eljárás segítségével ki tudja választani azt a fényforrást, ami a legközelebb áll a mérendő, ismeretlen LED-hez, és ezt használja később a méréshez. Mint tudományos eljárás a módszer korrekt, és a tézispont elfogadható. Felvetődik a kérdés: nincs-e azonban túlbonyolítva a végcél eléréséhez vezető út? Különösen keskeny sugárzó LED-ek esetében nem elegendő-e egyszerűen lemérni az ismeretlen fényforrás x és y koordinátáit, amelyek már többé-kevésbé amúgy is meghatározzák a fényforrás hullámhosszát, nemes egyszerűséggel kiválasztani a hozzá legközelebb eső fényforrást, amire már elvégeztem az egyedi kalibrációt, és ezt használni a méréshez? A válasz megtalálható a dolgozatban, nevezetesen a fényforrások aszimmetrikus teljesítményeloszlásával van kapcsolatban. Az adaptív mátrix-transzformációs módszer a mérendő LED spektrális teljesítményeloszlásának aszimmetriájára érzékeny.

A szerző a 2.1.3. alfejezetben adott fényforráscsoport felhasználásával igazolja tézispontjait.

A 2.2. fejezet és alfejezetei a szkennerek és digitális kamerák karakterizációját vezeti be. A szerző rámutat a feladat gyakorlati jelentőségére, miszerint a digitalizált kép minél jobban kell, hogy hasonlítson az eredetire. Ehhez a (2-20) – (2-23) feltételrendszeren keresztül kíván eljutni. Rámutat, hogy bár matematikailag a legkisebb négyzetetek módszerén alapuló módszer végezné ezt el, a színkülönbségek minimalizálásán alapuló feltétel mégis jobb eredményt adhat. Mi több, a kettő akár egymás ellen is hathat, mert például ha a színtérést szorítjuk le, az a detektorérzékenységi görbék oszcillálását okozhatja. A szerző folyamatábrákon mutatja be a végzett minimalizáló eljárásokat. A 2.2.1. standard és nem standard megvilágítókat, illetve magukat a szkennerek fényforrásait értékelte ki. A szerző megállapította, hogy a legjobb értékeket – talán várhatóan – a nappali eloszláshoz közeli értékek adták, míg legrosszabbul – az egyéb paraméterek, főleg valószínűleg az árak miatt – választott fluoreszcens lámpák adták. Kérdésem ezen keresztül a teljes 2.2 és 2.3 fejezetekhez kapcsolódik: van-e a szerző munkájának bármilyen visszacsatolása az említett gyártók felé? Figyelembe veszik-e megállapításait, a kifejlesztett karakterizációs munkájukat a termékfejlesztés során? Létrejöhetnek-e olyan, vélhetőleg professzionális felhasználásra szánt, nem árérzékeny eszközök, melyeknél a színhűséget a szerző munkájának felhasználásával érték el?

A fejezet kapcsán ismét kitérek a bevezetőben említettekre. A dolgozat nagy erénye, hogy rámutat az alkalmazott statisztikai módszerek alkalmazhatósági feltételeire, illetve ezek fenn nem állása esetén bekövetkező hibás megállapításokra. Nemcsak ezen a területen igaz sajnós, hogy heteroszkedaszticitás lép fel, azaz különbözőek a szórások (illetve varianciák). Ennek eredményeképp a várható érték szórása nagy, vagyis tulajdonképpen nem tudok állítani semmit. Hasonló megállapításokat tesz a véges számú pigmentek miatti autokorrelációról. Véleményem szerint ennek a vizsgálata során tett megállapítások megütik az önálló tézispont szintjét. Különösen akkor, ha figyelembe vesszük, hogy a szerző szerint több, e témájú publikáció átsiklott ezen. A szerző már itt megadja a megoldás kulcsát, miszerint olyan mintákat kell kiválasztani, ahol ezen

problémák nem lépnek föl, a kiválasztás módszerét pedig a 2.3.1.1-es fejezetben tervezi bemutatni, a 2.3. fejezetben és alfejezeteiben választ kapunk a kiválasztás mikéntjére.

A 2.3.2.1. fejezetben ismerteti a szerző az általa kifejlesztett, klaszteranalízis alapján működő SCRS módszert. Az első lépésben frappáns módszert említ a szerző a heteroszkedaszticitás csökkentésére: szűrjük ki a kicsi szóródási mutatókkal rendelkező mintákat. Ezáltal csökken a szórások közti különbség, hiszen a szórások hisztogramjának alsó szegmensét levágtuk. Kérdésem: lehet-e már ekkor – a klaszteranalízis mellőzésével – eredményes karakterizációt végezni? A második és harmadik lépés sem kevésbé frappáns: a hasonlóknak tekintett mintákból csoportokat képez, míg a csoportokból választ ki reprezentáns elemeket. Ezáltal biztosítja a szerző az autokorreláció és a multikolinearitás csökkentését. Kérdésem: szükség van-e ezek után a minták előszűrésére? A harmadik lépésben úgyszintén a legnagyobb szóródási mutatójú elemet választja, tehát a kis szóródású minták se így, se úgy nem kerülhetnek a karakterizáló minták közé. Elegendő-e mindig automatikusan a legnagyobb szóródású mintát venni? Nem csökkenthető-e méginkább a heteroszkedaszticitás, ha szándékosan hasonló szóródási mutatókkal rendelkező mintákat választunk ki a klaszterekből?

A 2.3.3.1 fejezetben a szerző az előzetes információkkal való rendelkezés esetét vizsgálja. Itt a fejezet elején bemutatott, (2-26) – (2-29) differencia célfüggvényeket minimalizálása adja mintakiválasztás alapját. A szerző összeveti az általa javasolt módszert az irodalomban leírtakkal, és indokolja, hogy miért a sajátját kívánja használni a továbbiakban. Hasonlóképpen a statisztikai módszert helyezi előtérbe a 2.3.3.2. fejezetben is. E fejezet végén fogalmazza meg az általa harmadiknak nevezett, valójában negyedik T4 tézispontját, miszerint rövidítve az SCRS statisztikai módszerrel a detektorérzékenységre adott becslés javítható.

A tézispont a 2.3.4. fejezetben kerül bizonyításra konkrét mérések által. Figyelemre méltó összefoglalása a mérési eredményeknek a 11. táblázat. Egyfelől szembeveti, hogy a válogatatlan, 1269 mintából álló halmazon alapuló eljárás minden esetben rosszabb eredményt hozott, mint a – valamilyen módon kiválasztott – 36 darabos szett eredménye. Ezen 36-os szettek között is a szerző SCRS kiválasztási módszerrel létrehozott sorozata bizonyult a legjobbnak, ismét csak minden esetben. A kapott eredményre magyarázatot is kapunk a fejezetben. A fejezet másik része a szkennerek

spektrális érzékenységi görbéjének becslésével foglalkozik. A 37. ábra a Cheung és Westland kiválasztási módszerével végzett detektorérzékenységet hasonlítja össze a szerző SCRS módszerével. A különbség nem tűnik nagynak, bár az SCRS esetén nem jelentkeznek egyedi csúcsok, mint a CW módszer zöld görbéjénél 480 nm körül. Korábban az SCRS után a legjobb eredményeket a CW módszer adta (11. táblázat). Érdekes lett volna ebben az esetben is látni a Hardenberg kiválasztási módszerén alapuló görbéket. Végül, de nem utolsó sorban a spektrális karakterizáción alapuló módszerek reprodukálóképességei kerülnek összehasonlításra (12. táblázat.) Kiemelendő, hogy a szerző gondolatmenete szerint az SCRS módszerrel kapott színkülönbség tovább már nemigen csökkenthető a beszkenelt kép inhomogenitása miatt, illetve a kapott érték amúgy is az emberi szem által még érzékelhető különbség határának a közelében van. A fejezet meggyőzően bizonyítja, hogy a 4. tézispont is mindenképp elfogadható.

A dolgozathoz végezetül már csak egy kérdés vetődik fel: elképzelhető-e, hogy más, nem föltétlen szórakoztatásra (kamera, illetve képek rögzítésére, reprodukálására használható szkennerek) szánt digitális eszközöknél is használható lesz a módszer? Hasznos lehet-e például színes képet adó orvosi tomográfok esetében? Elérhető lesz-e ezáltal jobb kiértékelés, kisebb alkalmazott dózis?

A dolgozat nyelvezete és külalakja

A dolgozat nyelvezete szép, fogalmazása korrekt. A két fejezetes felépítés (előzmények és saját eredmények) miatt néha sok az alfejezetek szintje (például a 2.1.1.1.2. fejezet), ez néha szintén nehézkessé teszi az olvasást. Talán célszerűbb lett volna több főfejezetet alkotni. Ezen megállapítások a dolgozat szakmai értékét természetesen nem befolyásolják.

A dolgozat ábrái érthetőek, követhetőek, világosak. A 36. ábra esetében a szövegszerkesztő megtréfálta a szerzőt, az ábra beillesztésekor a cím, a tengelyfeliratok sajátos módon kódolódtak. Ha valaki igazán kekeckedni akar, akkor megemlítheti, hogy több ábra esetében az x tengely nem tartalmaz megnevezést (hullámhossz), hanem csak mértékegységet (nm), de ez az olvasásban gondot nem okoz.

Összefoglalás

Igényes, színvonalas, aktuális problémát feldolgozó és gyakorlati alkalmazással kecsegtető munkát végzett a szerző. Külön kiemelendő a matematikai háttér alapos vizsgálata. A dolgozat tartalmaz új tudományos eredményeket, melyeket részletesen összevetet a szerző a korábbi munkákkal. Ugyancsak kiemelendő a tekintélyes, 100 fölötti számú irodalmi hivatkozás, melyből, ha jól számoltam, 7 esetben a szerző is társszerző volt.

A dolgozat mind a 4 tézispontját önálló eredménynek elismerem, az értekezés doktori fokozat megadásának alapjául történő elfogadásra javaslom.

Tisztelettel,



Tóth Zoltán