

DIPLOMADOLGOZAT

Németh Botond

2024

Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem
Budai Campus
Élelmiszeripari Méréstechnika és Automatizálási Tanszék
Élelmiszermérnök mesterképzési szak

Élelmiszerek látórendszeres színmérése

Belső konzulens:	Dr. Baranyai László Tanszékvezető
Belső konzulens tanszéke:	Élelmiszeripari Méréstechnika és Automatizálási Tanszék
Készítette:	Németh Botond

Budapest

2024

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés és célkitűzés.....	1
2. Irodalmi áttekintés	2
2.1 Színmérés.....	2
2.1.1 Emberi színlátás	2
2.1.2 CIE színterek	3
2.2 Digitális látórendszerek	4
2.2.1 CCD és CMOS szenzorok.....	4
2.2.2 sRGB színtér használata.....	6
2.3 Élelmiszeripari látórendszerek.....	7
2.4 Látórendszerek szerepe az automatizálásban.....	8
3. Anyagok és módszerek.....	9
3.1 Felhasznált anyagok és műszerek	9
3.1.1 Látórendszer	9
3.1.2 Képfeldolgozó szoftver	10
3.1.3 Színmérő műszerek	10
3.2 Mérési módszerek	10
3.2.1 Felvétel készítés	10
3.2.1 Képfeldolgozás.....	11
3.2.2 Kalibrálás	12
3.2.3 Validálás.....	13
3.2.4 Húspogácsák mérése	13
4. Eredmények kiértékelése.....	14
4.1 Kalibráció.....	14
4.2 Validálás	19
4.2.1 Termények színmérése.....	19
4.2.2 Laskagombatartalmú húspogácsák színmérése.....	27
5. Következtetések és javaslatok	30
6. Összefoglalás.....	31
Köszönetnyilvánítás	1
Irodalomjegyzék	1

1. Bevezetés és célkitűzés

A látórendszerek számos iparágban elterjedtek az utóbbi évtizedekben és az agrár területek sem kivételek. Akár élelmiszerfeldolgozó üzemekben válogató, vagy minőségbiztosító rendszerekben is megtalálhatóak, de folynak kutatások látórendszer asszisztálta automata betakarítórendszerek kidolgozásán is. Az ilyen technológiákkal kiváltható nagymennyiségű kézimunka mely költséghatékonyabbá teheti ezeket a kritikus folyamatokat. Ezen technológiákhoz elengedhetetlen a megfelelő mérés technika megléte többek közt a látórendszerek és az azokkal történő színmérés is, és szükség van az ilyen területen történő kutatásokra, hogy az iparban is alkalmazható technológiákat legyünk képesek fejleszteni.

A technika fejlődésével egyre könnyebben lehet hozzájutni nagyfelbontású kamerákhoz, amelyek alapját képezheti akár laboratóriumi vagy üzemi látórendszereknek. Ahhoz, hogy ezen eszközök által rögzített képeket, felvételeket alkalmazni lehessen a megfelelő szoftveres háttér és szakértelemre van szükség. De ezeket akár kisebb cégek is elérhetik, ahol nincsen erőforrás nagy gépesített látórendszerek alkalmazására csak fogyasztói kamerára és nyílt forráskódú szoftverekre. A színmérés gyakran előfordul alapanyagátvételnél, válogató műveleteknél és egyéb minőségbiztosítási lépéseknél, és ezen folyamatok a gyorsítása, egyszerűsítése nagy segíthet nyújthat a termelékenység és gazdaságosság növelésére.

A diplomamunkám célja egy fogyasztói digitális kamera tesztelése, azt használva egy látórendszer kiépítése, és az ehhez szükséges irodalmi háttér feltárása. A látórendszer összehangolása egy referencia koloriméterrel, kalibráció, majd validálása a rendszernek. Ezt követően további mérések elvégzése, amelyekkel a látórendszer határait tervezem feszegetni, ezzel feltárva annak alkalmazhatóságát nehezebben kontrolálható környezetben. Emellett céloim még a kamera által készített felvételek feldolgozásának szoftveres megvalósítása, szegmentálás, színmérés, kalibráció, melyek alapot adhatnak ehhez hasonló látórendszerek további fejlesztésére, akár mozgóképek, vagy más kamerák által készített felvételek alapján történő színmérések megvalósításához.

2. Irodalmi áttekintés

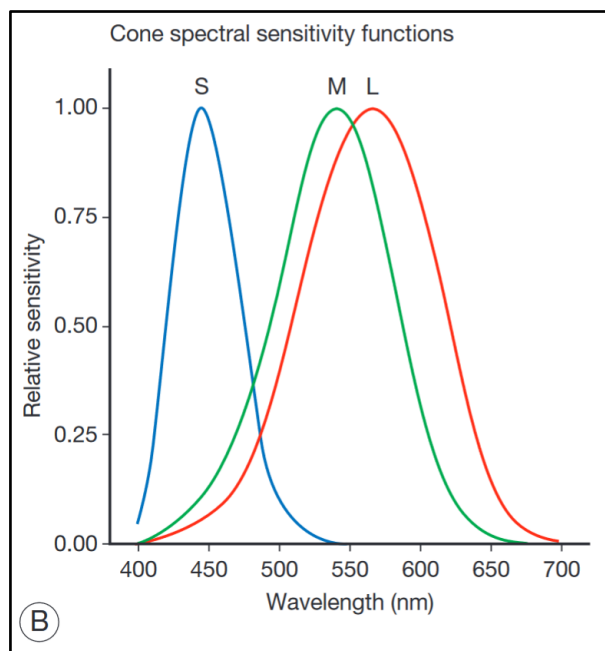
2.1 Színmérés

2.1.1 Emberi színlátás

Az emberi szem színlátása a fotoreceptoraink, azaz színérzékelő sejtjeink által valósul meg, azon belül is a háromféle csap, melyek a rövid, közép, és hosszú hullámhosszúságú fényre érzékenyek. Az 1. ábrán látható ezen sejtek relatív érzékenysége a fény hullámhossz spektrumán. Érdeemes kiemelni, hogy az egyes sejtek érzékenysége átfedi egymást, azaz több sejt is érzékelhet egy adott hullámhosszúságú fényt. Ennek eredménye, hogy bizonyos különböző spektrumú fényforrásokat az emberi látórendszer ugyan olyan színűnek érzékelheti. Ezt az effektust hívjuk metamerizmusnak, és az ilyen fényforrásokat pedig metamereknek. Ez a jelenség teszi lehetővé például a keskeny emissziós spektrummal rendelkező LED-ek vagy fluoresszensz izzóknak, hogy a megfelelő kombinációjuk ugyanolyan érzékelt színhatást váltos ki mint a ténylegesen széles spektrummal rendelkező napfény. A metamerizmus jelenségét fontos figyelembe venni a színmérő rendszereknél, ahhoz hogy az emberi látással összeegyeztethető eredményeket kapjunk.

1. Ábra: Csap sejtek relatív spektrális érzékenységei.

(Forrás: Color Vision and Night Vision. Dingcai Cao(2013), Fig. 10.2 B)

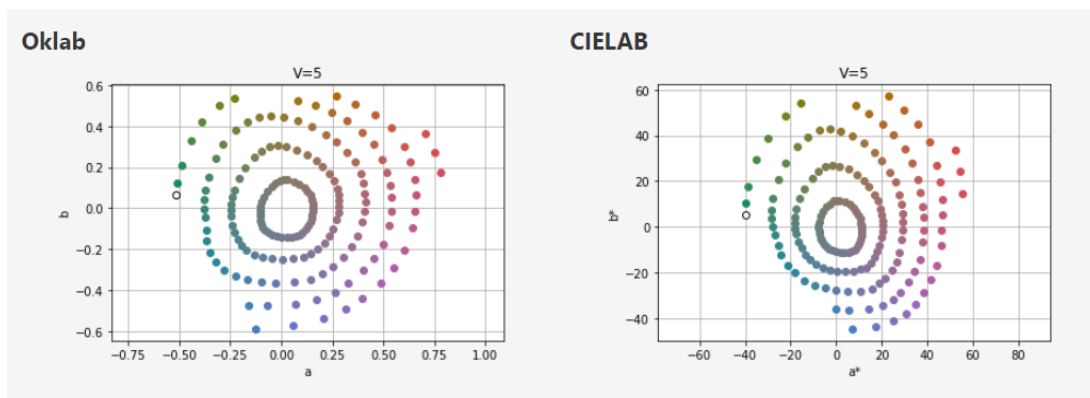


2.1.2 CIE színterek

A Nemzetközi Világítástechnikai Bizottság (Commission internationale de L'éclairage, azaz CIE) 1913-ban alakult, és azóta számos fényvel, látással, világítással kapcsolatos kiadványt és szabványt adott ki. Ők alkották meg a színmérésben a mai napig használt színtereket. A CIE XYZ színtér létrehozását megelőzte kettő független kutatás W. David Wright és John Guild által 1920-ban az emberi színlátásról. A kísérletek során a résztvevőknek három alapszín világosságának beállításával kellett, egy célszint kikeverniük. Több színhármaszt is használtak ezekben a kísérletekben, de a CIE összegezte ezeket és standardizálta és létrehozta a CIE RGB színínger-megfelelő függvényeket, amiknek a három alapszínínger összetevője a monokromatikus vörös (700nm), zöld (546,1nm) és kék (435,8nm). Ezek lineáris kombinációjával lehet kiszámolni a X Y és Z színínger összetevőket.

A CIELab színteret 1976-ban hozták létre azzal a céllal, hogy a numerikus értékei tükrözzék az emberi szem által érzékelhető színváltozást. Három színteralkomponens alkotja a színteret az L^* világossági tényező, a^* vörös-zöld és a b^* sárga-kék komponens. Az L^* értéke 0 és 100 között változhat a 100-as érték a teljesen fehér. Az ellentétes színmodel alapján az a^* pozitív értékei a vöröses színárnyalatok, a negatív értékei a zöldes színek, a b^* pozitív értékei felé sárgábbak a negatív értékei felé kékebbek a színek. A Lab értékek kiszámíthatóak az XYZ értékek alapján a referencia fehér ismeretében, a megvilágítással amit standard fényforrásokkal szoktak közelíteni, például C vagy D65 (olyan elméleti fényforrás ami 6500K-es feketetest sugárzást bocsájt ki). A CIELab vizuális egyenletessége, nem tökéletes és voltak próbálkozások a javítására (Kuehni 1998). Képfeldolgozásban való használatra Ottoson (2020) kifejlesztett egy CIELab-hoz hasonló színteret OKLab néven, amely jobb vizuális egyenletességet ért el. Az 2. ábrán látható a két színtér összehasonlítása a Munsell színadatokkal. Mivel kifejezetten digitális képfeldolgozó környezetben való használatra alkotta, a könnyebb használhatóság miatt a D65 referencia fehéret használja a színtér, mint sok más színtér melyet kifejezetten képernyők és hasonló kijelzők használnak mint például az sRGB, Display P3 vagy a rec2020. Még igen új ez a színtér, de az utóbbi pár évben több cikk is megjelent amelyben használják, összehasonlítják az OKLab színteret (Warchol et al. 2024, Voggu és Rao 2024, Fascione és Hanika 2024).

2. ábra: A CIELab és az OKLab összehasonlítása Munsell színadatokkal (részlet) (Ottoson 2020)



2.2 Digitális látórendszerek

2.2.1 CCD és CMOS szenzorok

A digitális kamerákban alkalmazott szenzorok a fényképezés egyik legfontosabb elemei, mivel ezek felelősek a fény rögzítéséért és az optika által alkotott kép digitalizálásáért. A két legelterjedtebb típus a CCD (Charge-Coupled Device) és a CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor) szenzor. Mindkét típusnak megvannak a sajátosságai, amelyek befolyásolják a képminőséget, az energiafogyasztást és a szenzorok általános felhasználási területeit (Fossum, 1997).

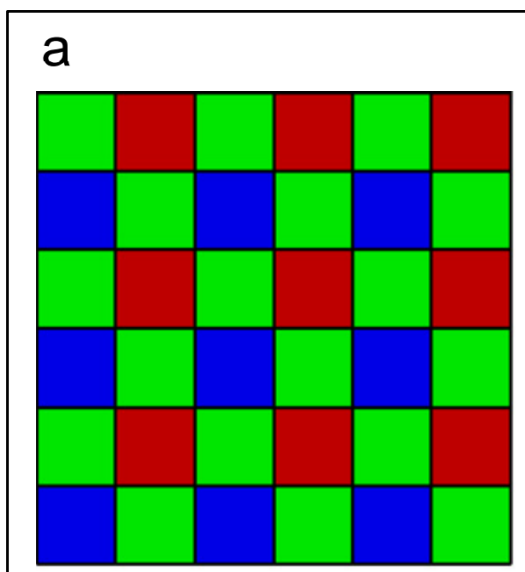
A CCD szenzorok régebbi technológiának számítanak, és hosszú ideig dominálték a digitális képképzés területén. Működésük lényege, hogy a beérkező fényt elektromos töltéssé alakítják, amelyet sorban továbbítanak a szenzor egyik végére, ahol az egy digitális jellé konvertálódik. Ez a megoldás rendkívül precíz töltéstovábbítást tesz lehetővé, így a CCD szenzorok gyakran kiváló minőségű képeket produkálnak, különösen alacsony fényviszonyok között. Ennek köszönhetően sokáig az előnyben részesített technológia volt a fényképezés és videófelvételek terén (Holst, 1996). A CCD szenzoroknak azonban van néhány hátránya is. A töltéstovábbítás energiaigényes folyamat, ezért ezek a szenzorok általában nagyobb energiafogyasztással járnak, ami korlátozhatja az akkumulátor üzemidejét, különösen a hordozható eszközökben. Emellett a gyártási költségük is magasabb lehet, mivel a precíziós eljárások szükségesek az elkészítésükhöz.

A CMOS szenzorok működése eltér a CCD-éktől. Míg a CCD esetében a töltést sorban továbbítják, a CMOS szenzorok minden egyes pixelénél különálló áramkör található, amely

közvetlenül digitális jellé alakítja a fény által generált töltést. Ez a megoldás lehetővé teszi a gyorsabb képrögzítést és az alacsonyabb energiafogyasztást, mivel az egyes pixelek önállóan dolgoznak fel adatokat. Ennek köszönhetően a CMOS szenzorok jelentősen csökkenthetik a kamerák energiafogyasztását, és olcsóbban is előállíthatók, mint a CCD szenzorok. Azonban a CMOS szenzorok esetén az egyik legnagyobb kihívás a zajkezelés, különösen gyenge fényviszonyok között, mivel az egyes pixelek közötti áramköri különbségek nagyobb mértékű képzajt eredményezhetnek. Ezért régebben a CMOS szenzorok nem voltak olyan alkalmasak a professzionális fényképezéshez, mint a CCD szenzorok. Az utóbbi években azonban a technológiai fejlődés jelentősen javította a CMOS szenzorok képességeit, és ma már számos professzionális kamera is ezt a technológiát alkalmazza, az alacsonyabb energiaigény, kisebb tömeg és kompaktságuk miatt (Waltham, 2013)

A szenzor pixelei csak a beérkező fény mennyiségét képesek érzékelni annak spektrumát nem. Ebből adódóan csak fekete-fehér képeket lehetne velük rögzíteni. Ahhoz, hogy színes képet kapjunk a pixelek elé filtereket kell helyezni, amelyek csak a fény adott hullámhosszait engedik át. 1976-ban Bryce E. Bayer által beadott szabadalom volt az első, amely ezt a fajta filter sorozatot leírta. Az 3. ábrán látható a bayer minta, melynek fele zöld, másik fele pedig egyenlő arányban kék és piros. Minden egyes filter egy képpontot fed. Az így kapott kép, noha színes, a Bayer mozaik mintája viszont továbbra is szembetűnő. Menon és Calvagno (2011) munkájukban összefoglalják a legtöbb úgynevezett debayerező, vagy demozaikoló algoritmust, amellyel a pixelek másik két csatornáját ki lehet számítani. Öt fő kategóriába: heurisztikus módszerek, interpolációkon alapuló algoritmusok, frekvenciatartomány elemzéssel, hullámcsomag alapú módszerekkel és rekonstrukciós technikákkal. Mint sok más területen is a deep neural network (mély neurális hálózat) használata a demozaikolás területén is alkalmazásra talált. Kwan és munkatársai (2019) a NASA (Amerikai Egyesült Államok Nemzeti Repülési és Űrhajózási Hivatala) Curiosity mars-járóján található kamerák által készített felvételek feldolgozásánál hasonlították össze a gépi tanulással segített és a hagyományos demozaikoló módszereket. Azt találták, hogy a mély tanuláson alapuló sok esetben jobb volt a hagyományos technikáknál, de nem minden esetben.

3. ábra: Bayer filter mozaik (Menon és Calvagno, 2011. Fig. 1. a)



2.2.2 sRGB színtér használata

Az sRGB színtért használja a legtöbb digitális kijelzőm képfájl és internetes felület. Eredetileg a Microsoft és a HP (Hewlett-Packard társaság) hozta létre, de később a Nemzetközi Elektrotechnikai Bizottság (International Electrotechnical Commission, azaz IEC) standardizálta (IEC 61966-2-1:1999). A digitális kamerák RGB pixelekkel dolgoznak és a legtöbb sRGB színteret alkalmaz, néhányuk akár az Adobe RGB színtérben is képesek felvételeket készíteni.

Mendoza és munkatársai 2006-os munkájában a látórendszereket vizsgálták melyek különböző színtereket alkalmaztak, köztük az sRGB-t is. Arra jutottak, hogy noha könnyedén lehet a kamerából eszköz független színterekbe konvertálni az adatokat, mint például a CIE XYZ-be, de a mért színezetet jelentősen befolyásolta a háttér, az alany felszíne, valamint annak a fényessége, arról való spekuláris visszaverődések. A szerzők javaslata, hogy a görbült felülettel rendelkező élelmiszerek színmérésére a CIE $L^*a^*b^*$ a legjobb. A 2012-es cikkükben Menesatti és munkatársai a kamerák által rögzített adatokat más színtérbe való konvertálás nélkül, azaz RGB-ben kalibrálta a színetalon értékeihez. Egy úgynevezett TPS-3D (3-dimentional sRGB Thin-Plate Spline interpolation) módszerrel kiváló eredményeket kaptak a kalibráció során. Ehhez olyan színetalonra volt szükségük, amelynek ismert volt a reflektancia spektruma, vagy pedig spektrokoloriméterrel mérték meg, ha nem adta meg a gyártó. A szerzők továbbá felvetették, hogy ez a kalibrációs módszer használható lehet más színterekben is, mint például a CIE $L^*a^*b^*$ vagy akár HSV, valamint

más módszerekkel is lehetne kombinálni a hatékonyság növelésére biológiai alanyok vizsgálatánál.

2.3 Élelmiszeripari látórendszerek

A látórendszerek használata az élelmiszeriparban az utóbbi évtizedekben egyre jobban elterjedt, köszönhetően annak, hogy gyors és roncsolásmentes (Brosnan és Sun, 2004). Az ezredforduló előtt is már alkalmaztak látórendszereket (Gunasekaran, 1996) minőségbiztosítási területeken: méretmeghatározásra, defekt detektálásra, de akár jelek, karakterek felismerésére is. A színmérés esetében még csak RGB, valamint HSI (árnyalat, telítettség, intenzitás) színtereket alkalmaztak és csak kvalitatív információk kinyerésére. Gomes és Leta 2012-es munkájukban áttekintették az élelmiszer és agráripari alkalmazásait a látórendszereknek. A főbb meghatározható tulajdonságok a színezet, morfológia textúra és szerkezet. Az utóbbit almák, sajtok esetében használták, valamint készételeknél egy automatizált kategorizáló rendszert fejlesztettek, amely célja az étel komponensinek olyan eloszlása a tányéron, ami hasonlít a fogyasztók általi elrendezésre. Lien és munkatársai (2020) hűtve tárolt cseresznyék eltarthatóságát vizsgálták, és kísérleteik során látórendszeres színméréssel is vizsgálták a mintákat. HSI színteret és neutrális háttérrel használtak, így mivel csak a vizsgált minták rendelkeztek telítettséggel külön szegmentálási lépés nélkül is tisztán az alany mérése történt.

Élelmiszerek színmérésével foglalkozott Goñi és Salvadori (2016) és munkájukban koloriméterrel hasonlítottak össze látórendszeres méréseiket. Az általuk választott színtér a CIE $L^*a^*b^*$ volt. Több módszert is vizsgáltak a kamera által rögzített RGB adatokat cél színtérbe való konverziójára. A legegyszerűbb egy direkt konverziós modell, mely standard megvilágítást feltételez, ideális körülmények között, az RGB értékeket CIE XYZ-re majd a standard fényforrás (az ő méréseik során a D65) neutrális pontja segítségével $L^*a^*b^*$ -re számítja át. Emellett három empirikus kalibrációs modellt is vizsgáltak, melyek lineáris és négyzetes tagokat tartalmaztak az R, G, és B értékekkel, majd az azok közti kölcsönhatásokat is (R^*G , R^*B stb.) is belevették. A szerzők arra jutottak, hogy a kölcsönhatásokat is figyelembe vevő egyenlettel lehetett a legkisebb hibát elérni.

Ma és munkatársai (2015) által végzett áttekintésben a minőség megállapításban használt látórendszerekkel foglalkozó cikkeket tárgyaltak. Több cikk is foglalkozott osztályozással, felszíni sérülések detektálásával főleg termények esetében. Állati termékek elfogadhatósága, felszíni homogenitása, textúrája is a gyakran vizsgáltak és marhahús esetében a színhúsok

márványosságát, de a keménység és a lédúsásra is lehetett következtetni a látórendszerek mérési alapján. A szerzők említést tesznek a kombinált módszerekre is, ahol például akusztikus válasz mérésével kombinálják a látórendszer eredményeit. A látórendszerek elsősorban a látható színtartományban érzékelnek, de több kutatás is foglalkozott hiperspektrális mérésekkel is. Közeleli infravörös (NIR) tartományban végzett méréseket Firtha és Romvári (2014), marhahús márványozottság jellemzésének módszertanát taglalták. A NIR spektrumban a zsírra és a vízre jellemző csúcsok (1215nm és 1450nm) elkülönülnek és a zsírcsúcs magassága alapján jól elválasztható a zsírszövet az izomszövettől. A szerzők által kidolgozott algoritmus által becsült márványozottsági értékek korreláltak a szakértői véleményekkel.

2.4 Látórendszerek szerepe az automatizálásban

Tian és munkatársai (2020) áttekintő munkájukban a látórendszeres technológiák alkalmazásáról írtak, kifejezetten az agrár területeken. Az egyik ilyen technika az automatikus betakarítás. Az itt alkalmazott látórendszerek mind a látható, mind NIR (near infrared, azaz közeleli infravörös) tartományban is érzékeltek és azonosították a terményeket, gombákat, cseresznyét, paprikát. Az egyik tanulmányban tesztelt automatikus betakarító robot, 8 másodpercenként volt képes beazonosítani és betakarítani az almákat. A szerző által kiemelt legnagyobb kihívás a zajszűrés. A változó időjárási viszonyok, a fényviszonyok, rovarok és a por jelenléte mind zajt visz a rendszerbe, amelynek kiszűrése elengedhetetlen a megfelelő működéshez. Továbbá az ilyen rendszerek gyakorlatba helyezése egy összetett multidiszciplináris folyamat, melynek a végén egy gazdaságilag életképes technológiát kell megalkotni. Ennek az eléréséhez a szerző a 3 dimenziós leképzési módszereket tartja az egyik kiemelten fontos fejlesztési területnek.

A látórendszerek által begyűjtött adatokat használnak machine learning (gépi tanulás) rendszerek tanítására is. Benjdira és munkatársai (2020) légifelvételek szegmentálásra alkalmazott GAN (generative adversarial network azaz generatív ellenséges hálózatok) modellt. Az általuk fejlesztett rendszer képes volt légifelvételeken elkülöníteni az épületeket, járműveket és növényzetet 85%-os pontossággal. A gépi tanuláson alapuló modelleknek nagymennyiségű adatra van szükségük a megfelelő működéshez, ezen adatbázisok kiépítése igen fontos.

3. Anyagok és módszerek

3.1 Felhasznált anyagok és műszerek

3.1.1 Látórendszer

A Sony ZV-E10-es cserélhető objektíves digitális kamerát használtam (saját) a képek készítéséhez. A főbb jellemzői: APS-C méretű (23,5*15,6mm) CMOS szenzor, 24,2 megapixel (a teljes specifikáció a [gyártó hivatalos oldalán](#) található). Az általam használt objektív a Sony E PZ 16-50mm f 3,5-5,6 OSS (saját). A ZV-E10-es kamerán az effektív látószöge 83°-32° (a teljes specifikáció szintén a [gyártó hivatalos oldalán](#) található)

A színetalon (Datacolor Spyder Ckeckr 24, saját) színei mind az sRGB színtérbe esnek. Ezt tudatosan így tervezték, mivel a digitális kamerák legtöbbje sRGB-ben dolgozik, illetve a kijelzők nagytöbbsége csak sRGB színeket képes megjeleníteni. A színfoltok kódjelei a 4. ábrán láthatóak.

A mérést az Élelmiszeripari Méréstechnika és Automatizálás tanszék látórendszeres kamrájában végeztem. A beépített 2500K-es LED megvilágítás matt fehér falakról verődött a mérendő alanyra. A kamera a kamra tetején lévő résen keresztül láttot rá az alanyra.

4. ábra: Színetalon, a színfoltok kódjeleivel. (forrás: datacolor.com)



3.1.2 Képfeldolgozó szoftver

A képfeldolgozást szabad forráskódú python könyvtárakkal végeztem. A feldolgozási kódot a Spyder integrált fejlesztői környezetben (5.4.5-ös verzió) készítettem és futtatam, amely a python 3.11.5-ös verzióját használta. Az alábbi könyvtárak valamennyi funkcióját alkalmaztam:

- Nyers képfájl beolvasása, konvertálása:
 - rawpy 0.19.0
- Színterek közötti átszámítás, szegmentálás egyéb képfeldolgozási lépések
 - openCV 4.6
 - scikit-image 0.20.0
 - luxpy 1.9.8
- Grafikonkészítés, és egyéb ábrák készítése
 - matplotlib 3.7.2
 - seaborn 0.13.0
- Matematikai számítások, táblázatok készítése és exportálása
 - numpy 1.26
 - pandas 2.1.1

3.1.3 Színmérő műszerek

Konica Minolta CR-400 (Állatitermék és Élelmiszer tartósítási Technológia tanszék)

Color Lite (Élelmiszeripari Méréstechnika és Automatizálás tanszék)

Colormeter Pro (Élelmiszeripari Méréstechnika és Automatizálás tanszék)

3.2 Mérési módszerek

3.2.1 Felvétel készítés

Kamera beállítások:

- jpeg és RAW felvétel (megtekintésre, és képfeldolgozásra)

- Maximális optikai nagyítás (50mm)
- Manuális expozíció: f/5,6, ISO 100, záridő 1/15 mp
- Automata fókusz
- Fehéregyensúly kamera által mérve

Mérés menete:

- Színetalon hátoldalán található 18%-os szürke folt és a hisztogram segítségével a helyes expozíció beállítása.
- Fehéregyensúly mérése a 18%-os szürke színfolton.
- Felvétel készítése a színetalon mindkét oldaláról.
- Felvétel készítése a mérni kívánt mintákról.

Fontos, hogy a felvétel készítésekor az alany az objektív látóterének közepén legyen ezzel elkerülve az esetleges optikai hibákat, amelyek a kép szélén előfordulhatnak. A kamera automatikusan korrigálta az optika hordó alakú torzítását a gyártó által beépített profillal, de ez nem befolyásolta a mérés pontosságát mivel a torzítás csak a szélesebb látószögeknél és a kép szélén jelentkezik, valamint a színleképezésre nincsen hatással.

3.2.1 Képfeldolgozás

Képfeldolgozás lépései:

- A kamera nyers képfájl rögzít (Sony ARW 2.3) amely 24 Megapixeles (6024*4024 pixel) 14 bitmélységgel. Ezt a fájlt beolvassuk és a nyers RGB értékeket a fehéregyensúly és a debayer módszer megadásával XYZ színtérbe konvertáljuk.
- Az így kapott kép 16 bites és 3012 pixel széles és 2012 magas
- $L^*a^*b^*$ színtérbe átszámítás
- Szegmentálás, mérendő területek meghatározása
- Exportálás .csv táblázatként

Az általam választott debayerező algoritmus négy szomszédos pixelt kombinálja egy háromcsatornás pixellé, a két zöld pixel értéket átlagolja. Ezzel elkerülhető a debayerező

algoritmusok által hagyott hibák, valamint mivel a felvétel nagyfelbontású és az alany a kép jelentős részét kitölti, nem adódik információ vesztes a méretcsökkenésből. Nincsen lehetőség 14 bites képet exportálni az általam használt könyvtárral, ezért a nagyobb részletességet megőrző 16 bites opciót használtam. A szegmentáláshoz a képet külön HSV (hue, saturation, value azaz árnyalat, telítettség és érték) koordinátákra konvertáltam és az alanyt a rá jellemző értékekkel elválasztottam a háttértől.

3.2.2 Kalibrálás

A fenti képfeldolgozás által kapott értékek nem feltétlen pontosak, mivel a kamera nem rendelkezik belső referenciaértékekkel, amelyekkel képes lenne egyeztetni a mért értékeit. Ezért szükség van a készülék kalibrációjára. Mivel a mért pontok egymáshoz való relatív elhelyezkedése tükrözi a várt értékeket ezért elegendő egy polinomiális transzformációt elvégezni a mért értékekkel. Az általam használt kalibrálási egyenletet (1. képlet) Goñi és Salvadori (2017) munkájára alapoztam. Ők egy polinomiális empirikus egyenletet használtak a szegmentált kép R, G és B értékeiből számították ki az L^* , a^* és b^* értékeket, egy ismert $L^*a^*b^*$ értékekkel rendelkező színetalon segítségével. Én, mivel a kamera nyers RGB értékeit szoftveresen konvertáltam $L^*a^*b^*$ értékekre, az utóbbiak kalibrálására használtam az egyenletet. Az általam használt színetalon $L^*a^*b^*$ értékei a gyártó oldalán is megtalálтам, illetve 3 koloriméterrel is lemértem, mivel előfordulhatnak gyártási hibás színfoltok. A három koloriméter közül a ColorLite műszert választottam referenciának. A látórendszer által mért értékeket és a referencia értékek közötti kalibrációt Microsoft Excel (Verzió: 2410) Solver bővítményével végeztem, legkisebb négyzetek módszerrel közelítettem a kalibrált pontokat a referencia pontokhoz. Az optimalizálandó változók a 11 kalibrálási együttható.

$$\begin{aligned} L^*, a^*, b^* = & \alpha_1 L_{mért}^* + \alpha_2 a_{mért}^* + \alpha_3 b_{mért}^* + \alpha_4 L_{mért}^{*2} + \alpha_5 a_{mért}^{*2} \\ & + \alpha_6 b_{mért}^{*2} + \alpha_7 L_{mért}^* a_{mért}^* + \alpha_8 L_{mért}^* b_{mért}^* \\ & + \alpha_9 a_{mért}^* b_{mért}^* + \alpha_{10} L_{mért}^* a_{mért}^* b_{mért}^* + \alpha_{11} \end{aligned} \quad (1)$$

Ahol L^* , a^* , b^* a kalibrált színinger értékek, $L_{mért}^*$, $a_{mért}^*$, $b_{mért}^*$ a képfeldolgozás által adott nyers, kalibrálatlan színinger értékek, az α_n az adott tag együtthatója, melyek optimalizálásával történik a kalibráció.

3.2.3 Validálás

A kalibrációt követően azonos mérési körülmények között termények mérésével ellenőrizzük, hogy a látórendszer nem csak a kalibrálási pontokban mér pontosan, hanem a szintér egyéb pontjain is. Hasonlóan, mint a kalibráció során referencia műszerrel is lemértem az alanyokat, azok általános színezetét, ezt mindig a termény legnagyobb egyszínű felületén, több egymástól távoleső pontján. A látórendszeres kiértékelés után a kapott eredményeket összevetettem a referencia koloriméter által mért értékekkel.

Az alábbi terményekkel* történt a validáció:

- Narancs
- Zöldalma
- Banán (pár napnyi várakozás után lett mérve, hogy elkezdődjön a héj barnulása)
- Padlizsán
- Sárga és Piros kaliforniai paprika

3.2.4 Húspogácsák mérése

A validálást követően egy olyan mérést, és mérési környezetet hoztam létre melyekkel a látórendszer határait feszegettem, ezzel felderítve annak alkalmazhatóságát. A kamera és színetalon kompakt, mozgatható természetét kihasználva az volt az alapfeltételezés, hogy egy olyan termeléshez hasonló helyzetben is, amelyben nincsen külön felvételkedészítő kamra, hanem csak az üzemi megvilágítás, is lehet megfelelő méréseket végezni a látórendszerrel. A kísérlet az Állatitermék és Élelmiszer-tartósítási Technológia tanszék gyakorló üzemben történt, a referencia műszer a tanszéki Konica Minolta CR-400 volt.

Két szaktársam által végzett kísérletsorozatban, az általuk készített laskagomba tartalmú marhahúspogácsák színét mértem meg, azzal a további céllal, hogy vajon a termékek általános színezete alapján lehet-e következtetni az összetételbeli különbségeikre. A helyiség világítási viszonyaihoz az előző méréseknél is használt színetalon segítségével alkalmazkodtam, és a kalibráció elvégzésével a referencia által mért értékkel összehasonlítottam a látórendszert.

*Minden vizsgált termény helyi kiskereskedelmi élelmiszerboltban lett megvásárolva.

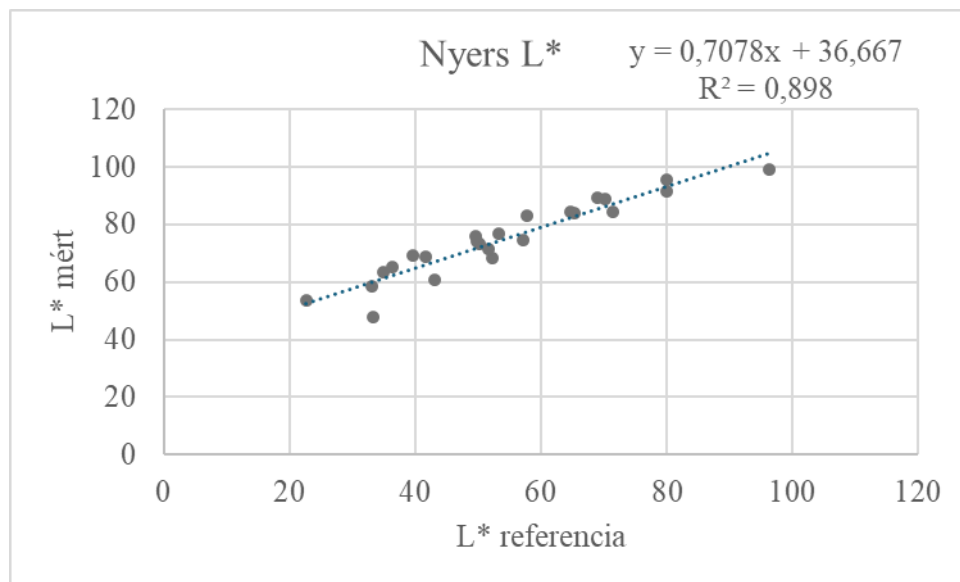
4. Eredmények kiértékelése

4.1 Kalibráció

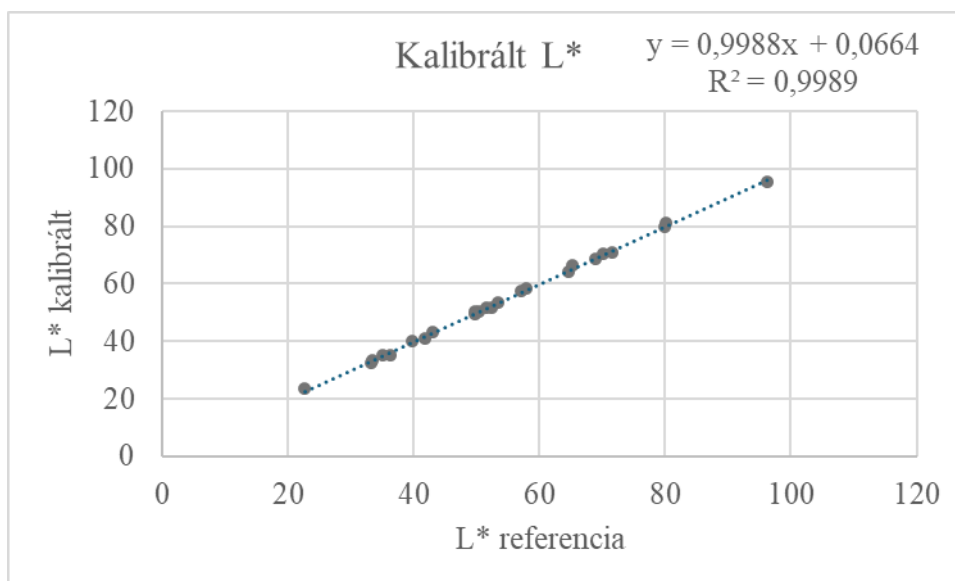
Az alábbi táblázatok a mért, nyers adatok és kalibrált értékek, illetve a referencia értékek közötti korrelációt mutatják, azaz a kalibráció sikerességét.

A világossági tényező esetében a mért értékek és referencia közötti lineáris kapcsolat fennállt (5. ábra), de abszolút értékben pozitív irányban eltolva az alacsonyabb értékek esetén. A 6. ábrán látható a kalibrált L^* értékek. Itt a korreláció igen erős ($R^2 > 0,99$) és az egyenes arány el lett érve, mivel az egyenes egyenletében a meredekség közel 1 és a tengelymetszet közel nulla.

5. ábra: A mért és a referencia világossági tényező közötti összefüggés. Az ábra jobb felső sarkában a regressziós egyenlet képlete és a korreláció négyzet.

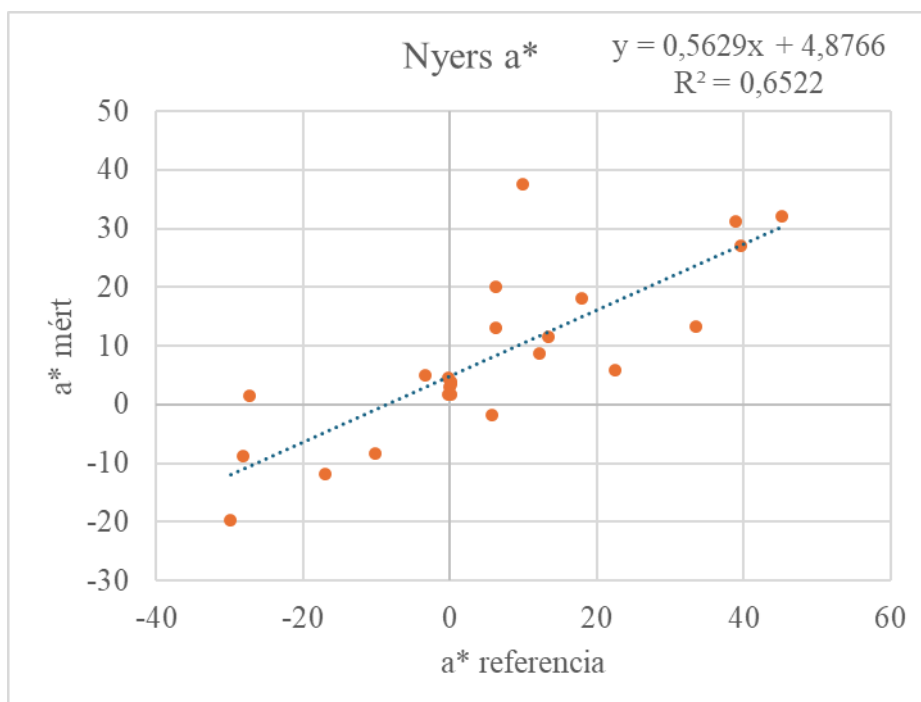


6. ábra: A kalibrált és a referencia világossági tényező közötti összefüggés. Az ábra jobb felső sarkában a regressziós egyenlet képlete és a korreláció négyzet.

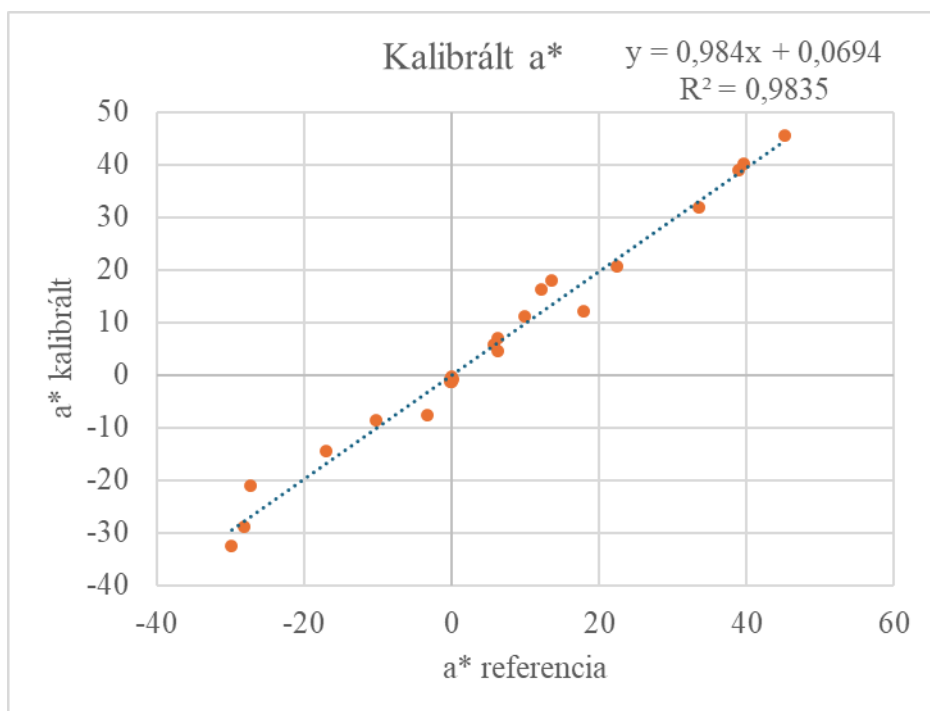


A vörös-zöld tényező kezdeti értékei és a referencia között jóval nagyobb különbség volt, főleg az 5 és 15 a^* -gal rendelkező színfoltok esetén (7. ábra). A kalibrációt követően viszont erős korreláció volt megfigyelhető (8. ábra) az R^2 érték 0,98, valamint a közelítő egyenes meredeksége és tengelymetszete a világossági értékekhez hasonlóan egyenes arányt mutatnak, tehát ezek alapján a mérőszámok alapján megfelelő volt a kalibráció.

7. ábra: A mért és a referencia vörös-zöld tényező közötti összefüggés. Az ábra jobb felső sarkában a regressziós egyenlet képlete és a korreláció négyzet.

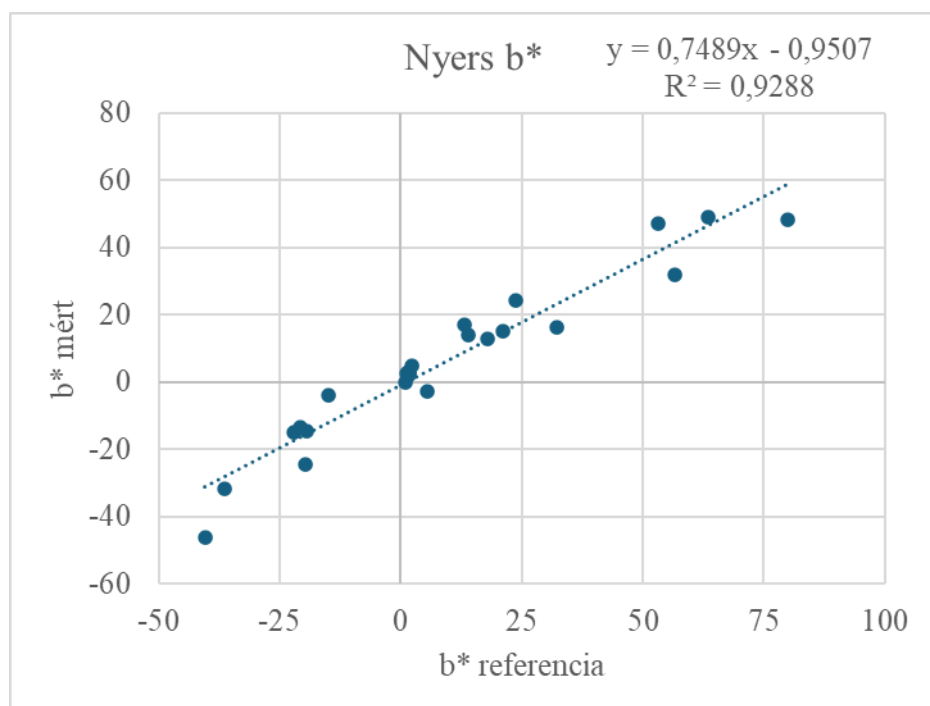


8. ábra: A kalibrált és a referencia vörös-zöld tényező közötti összefüggés. Az ábra jobb felső sarkában a regressziós egyenlet képlete és a korreláció négyzet.

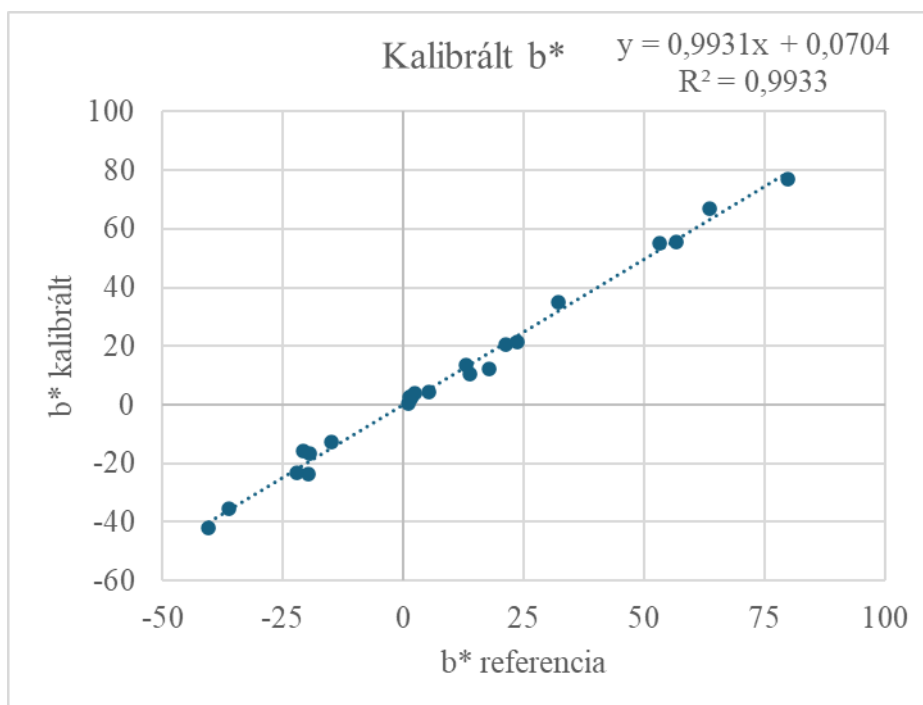


A sárga-kék színkomponens kezdeti értékei rendelkeztek a legkisebb eltéréssel a referenciától (9. ábra), és kalibráció után a többi színkomponenshez hasonlóan erősen korreláló ($R^2 > 0,99$) egyenes arányt vett fel a közelítő egyenes, mint látható a 10. ábrán.

9. ábra: A mért és a referencia sárga-kék tényező közötti összefüggés. Az ábra jobb felső sarkában a regressziós egyenlet képlete és a korreláció négyzet.

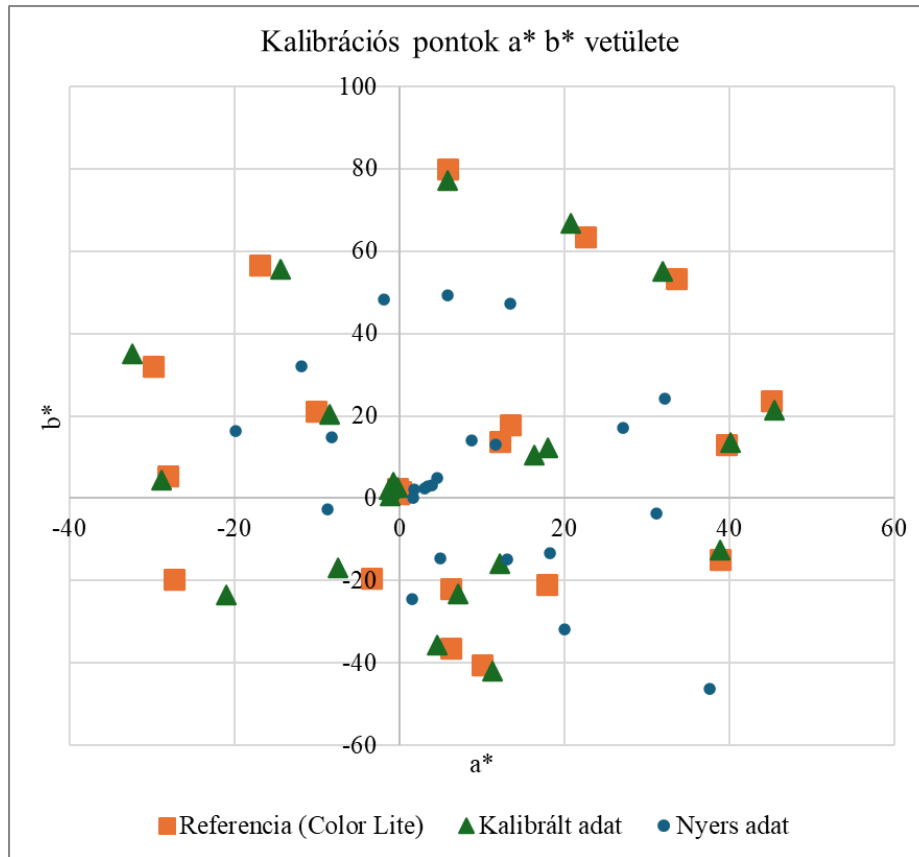


10. ábra: A kalibrált és a referencia sárga-kék tényező közötti összefüggés. Az ábra jobb felső sarkában a regressziós egyenlet képlete és a korreláció négyzet.



A 11. ábrán látható a mért, a referencia és a kalibrált pontok a^* b^* vetülete. Összeségében megfigyelhető, hogy a nyers adatok sokkal közelebb helyezkednek el az origóhoz, alacsonyabb telítettséggel rendelkeznek, valamint a neutrális színfoltok a vörös (a^* pozitív) iránybába voltak eltolva. A kalibrációt követően a pontok nagyrésze közel került a referenciához (átlag $\Delta E^* = 3,02$), de voltak színfoltok melyek kalibrációja nem volt ennyire sikeres.

11. ábra: A referencia, a mért és a kalibrált pontok a* b* vetülete



Továbbá az 12. ábrán látható dobozdiagrammon ábrázolva a kalibráció komponensenkénti, valamint teljes hibája, az utóbbi ΔE^* értékben kifejezve. A hibák kiszámítása az 2. 3. 4. és 5. képletek szerint történt.

$$\Delta L^* = \sqrt{(L_{ref} - L_{kalibrált})^2} \quad (2)$$

$$\Delta a^* = \sqrt{(a_{ref} - a_{kalibrált})^2} \quad (3)$$

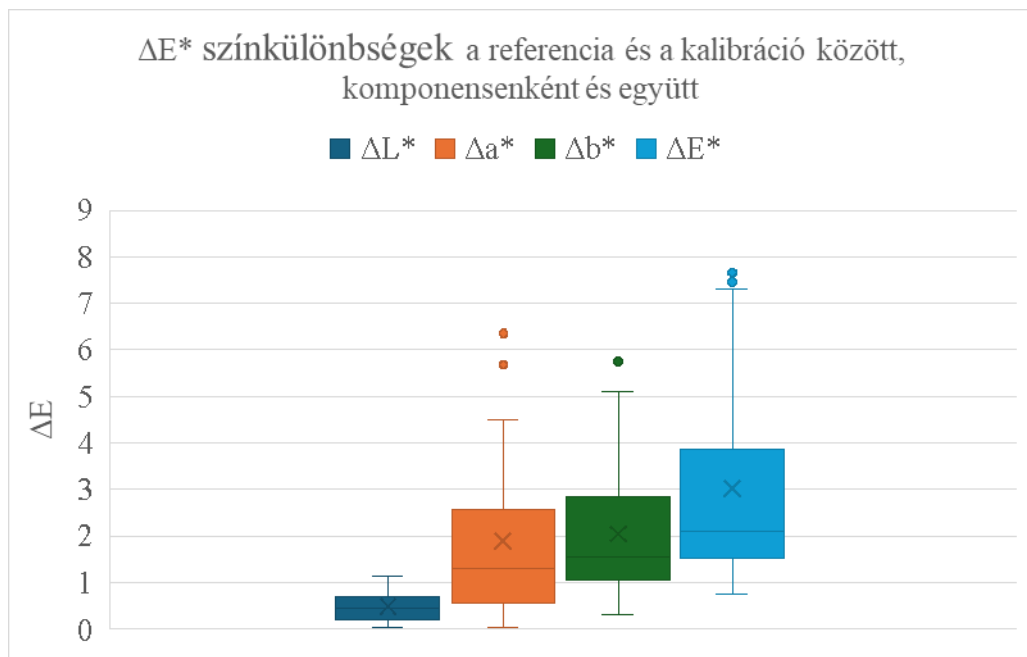
$$\Delta b^* = \sqrt{(b_{ref} - b_{kalibrált})^2} \quad (4)$$

$$\Delta E^* = \sqrt{(L_{ref} - L_{kalibrált})^2 + (a_{ref} - a_{kalibrált})^2 + (b_{ref} - b_{kalibrált})^2} \quad (5)$$

Az 12. ábrán látható, hogy a kalibráció legkisebb hibája a világossági tényező mentén volt. Itt csupán átlagosan 0,48 volt a hiba és a legmagasabb is csak 1,13. Az a^* és b^* ennél magasabb hibákkal rendelkeztek. Az előbbi átlagosan 1,89 az utóbbi 2,05. Kiugró értékek az 1F és 4G-vel jelölt színtoltok esetén voltak megfigyelhetőek az a^* esetén. Ezek zöldes

kék és lilás árnyalatok, melyek hibája arra utalna, hogy a kék színek mérésében lenne a hiba. Ezt azért nem lehet kijelenteni mert voltak olyan alacsonyabb b^* -gal rendelkező foltok melyek alacsonyabb hibával rendelkeznek. Tehát az tudjuk elmondani, hogy azok a pontok, amelyek negatív b^* -gal rendelkeznek és az a^* értékük abszolút értéke nem alacsony, nagyobb hibával rendelkeznek. A teljes hiba átlagosan 3,02, a legmagasabb hiba az 1F 4G és 5H színfoltok kalibrációja során lépett fel. Az utóbbi egy világosabb bőrszín, amely mind a vörös-zöld és sárga-kék tengely mentén is átlagnál magasabb hibával rendelkezett.

12. ábra: A kalibráció komponensenkénti és teljes hibája.



Összességében elmondható, hogy a kalibráció sikeres volt. Az alacsony, de nem nulla a^* -gal és egyszerre negatív b^* rendelkező színfoltok kalibrációja gyengébb. Ezt a további eredmények kiértékelésénél figyelembe kell venni.

4.2 Validálás

4.2.1 Termények színmérése

A fent bemutatott kalibrációval különböző színezetű gyümölcsökön és zöldségeken színmérését végeztem, azzal a céllal, hogy a látórendszert validáljam. A termények teljes színezetét ugyanazzal a referencia műszerrel is lemértem (ColorLite), 4 különböző ponton, mindegyik ponton a készülék 3 mérés átlagát jelezte ki.

A vizsgált hat termény a narancs (1. kép), zöldalma (2. kép), banán (3. kép), padlizsán és piros és sárga kaliforniai paprika. A képfeldolgozás során a szegmentálás egyszerű volt, a

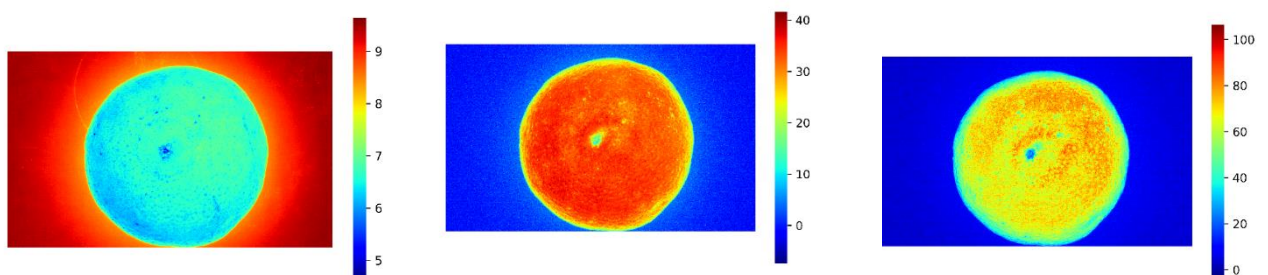
termékek egyöntetű és a háttértől eltérő színezetéből adódóan. A banán esetében, mivel, már barnulásnak indult külön végeztem mérést a még sárga részein és a barnult részein. A látórendszer által mért L^* a^* és b^* értékeket három pseudo-színes képpel vizualizáltam a narancs (13. ábra) zöldalma (15. ábra) és banán (17. ábra) esetében. Továbbá ábrázoltam az a^* b^* vetületét a mért értékeknek és a műszer által mért referencia pontoknak.

A narancs esetén a 14. ábrán látható, hogy a látórendszer jóval nagyobb szórással rendelkezik, mint a referencia műszer, valamint a műszer által mért értékek egy szigma távolságra esnek a látórendszer átlagértékétől. Ez azt jelenti, hogy a látórendszer pontossága közelíti a műszerét, de a precizitása jelentősen rosszabb. A szórással jelentősebb mértékű volt a b^* mentén, a 40 és 90-es érték közé esett a mérések 95%-a, míg a vörös-zöld színtényező mentén csupán 25 és 40 közé. Ennek az igen nagy szórásnak a magyarázata a látórendszer sajátosságából adódik. Az 13. ábra középső és jobb oldali ábráján, jól megfigyelhető a gyümölcs szélén egy látszólagos „perem”, ahol jelentősen alacsonyabb értékeket vesznek fel a képpontok. Ez a fakóbb „perem” annak köszönhető, hogy a felületről visszaverődő fény alacsony szögben verődik és a fresnel effektus miatt erősebb spekuláris visszaverődés történik, amely során a beeső fény csupán kisebb része nyelődik el, azaz a fényforráshoz fog hasonlítani, ami a mi esetünkben fehér.

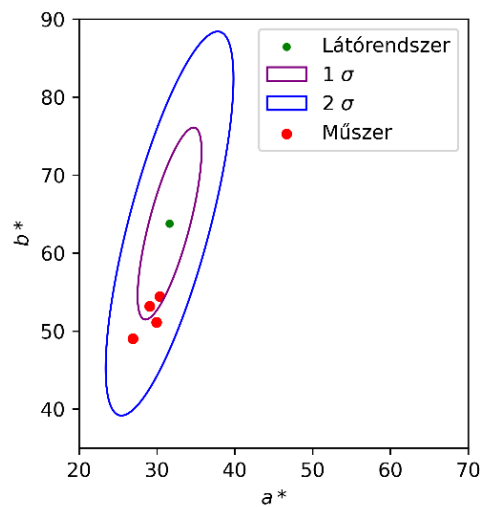
1. kép: A kamera által készített jpeg felvétel a narancsról (az alany körüli üres tér nélkül)



13. ábra: A narancs látórendszer által mért Lab értékei balról jobbra: L^* , a^* , b^* .



14. ábra: A narancs a látórendszer (zölddel átlag, lilával 1σ szórás, késsel 2σ szórás) és a referencia műszer (piros) által mért értékeinek a^* b^* vetülete.

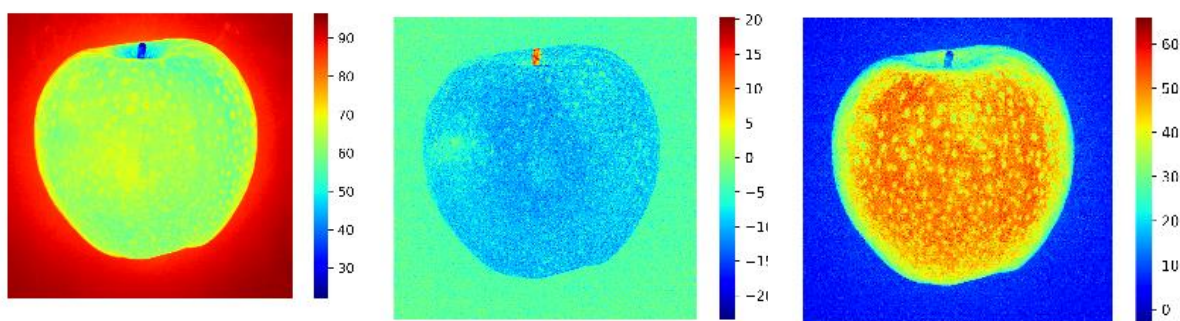


A zöldalma esetében a műszer is nagyobb szórással rendelkezett, és a pontok többsége az egy szigma távolságon belül esett (16. ábra). A mérés szórása ismét a sárga-kék színt komponens mentén volt a legjelentősebb. A szórást magyarázhatja az alma mintája, amely jól megfigyelhető az 15. ábra legjobboldalán is. Az alapfelület legmagasabb b^* értékkel rendelkező részei elérik a 60-at is míg a rajra lévő foltok nagyjá 40-es de 30-as értékeket is felvesznek. A referencia műszer adatai is mutatják ezt a fajta eloszlást.

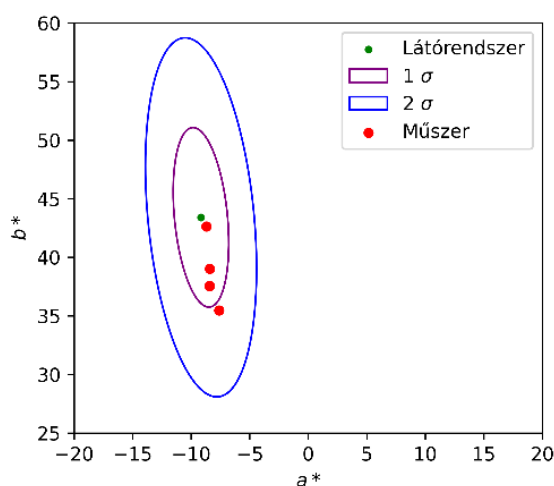
2. kép: A kamera által készített jpeg felvétel a zöldalmáról.



15. ábra: A zöldalma látórendszer által mért Lab értékei balról jobbra: L^* , a^* , b^* .



16. ábra: A zöldalma a látórendszer (zölddel átlag, lilával 1σ szórás, kékkel 2σ szórás) és a referencia műszer (piros) által mért értékeinek a^* b^* vetülete.

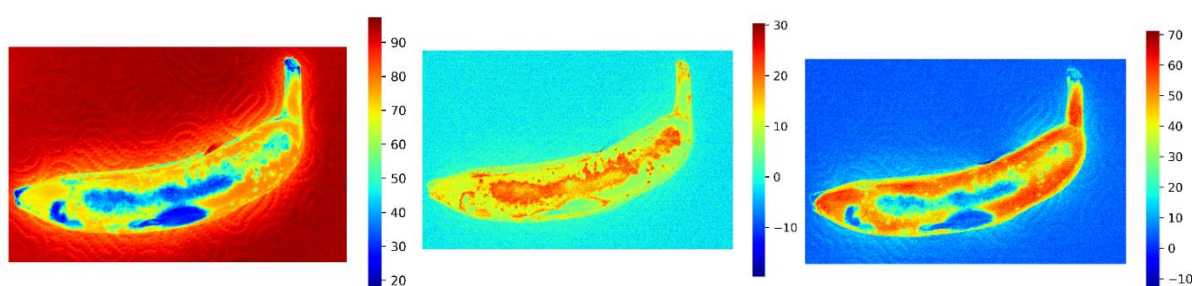


A banán esetén a sárga részek mérésénél pontatlanabb eredményt adott a látórendszer (18. ábra, bal oldal), de a barna folt mérésénél a többi gyümölcshez hasonlóan pontos eredményeket adott (18. ábra jobb oldal). A felszíni barnulás által kialakult gradiens a szegmentálást megnehezítette, az elválasztó árnyalati, telítettségi és világossági értékek meghúzása nagymértékben befolyásolta a mért szegmens értékeit. A sárga területeken mért értékek nagymértékű szórását is részben magyarázhatja, viszont a referenciához képesti magasabb értékekre a több barnább terület bevonása nem ad magyarázatot, mivel az ábra jobb oldalán látható értékek felé kellene eltolnia az átlagértéket.

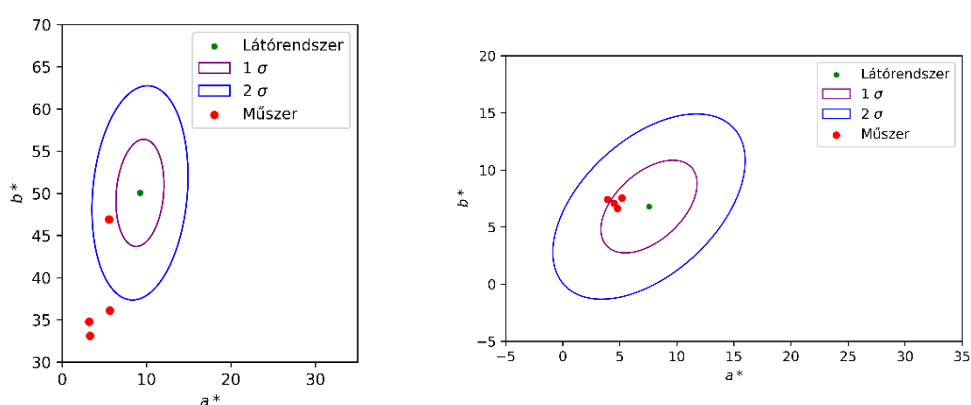
3. kép: A kamera által készített jpeg felvétel a banánról.



17. ábra: A banán látórendszer által mért Lab értékei balról jobbra: L^* , a^* , b^*



18. ábra: A banán a látórendszer (zölddel átlag, lilával 1σ szórás, kékkel 2σ szórás) és a referencia műszer (piros) által mért értékeinek a^* b^* vetülete. Bal oldalt a sárga részeken, jobb oldalt a barna folton mért értékek láthatóak.



A termények látórendszeres és referenciaműszeres értékei az 1. 2. és 3. táblázatban vannak összefoglalva. A látórendszer rendszerint magasabb értékeket adott, mint a referencia, élénkebbnek mérte a színeket. A világosságot tekintve szintén fölé lőtt a koloriméternek. A színkomponensenkénti korreláció is jelentősen, nagyobb és a közelítő egyenesek

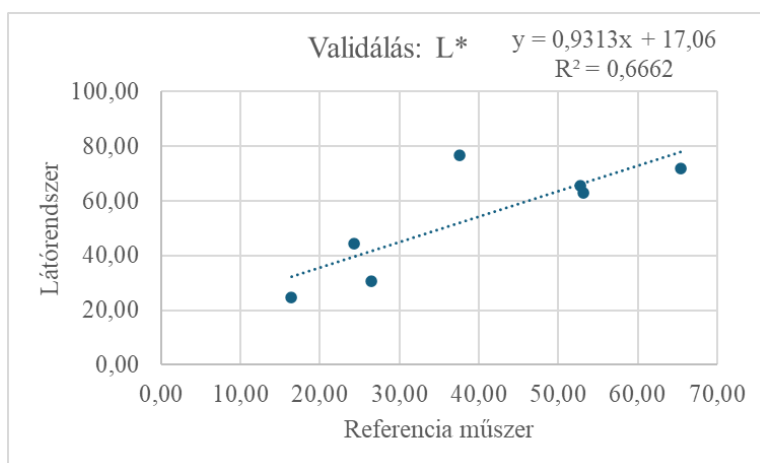
meredeksége és tengelymetszetei sem utalnak az egyenesarány elérésére. A ΔE^* értékek szintén igen magasak, már a második legalacsonyabb is magasabb, mint a kalibráció legnagyobb ΔE^* értéke.

A validálást a kalibrációhoz hasonlóan színkomponensenkénti korrelációs diagrammokkal is vizsgáltam. Az L^* esetében (19. ábra) a sárga kaliforniai paprika tért el a legjobban a referenciától, majdnem kétszeres értéket mutatott, emellett a mindegyik adatpont az átló felett van.

1. táblázat: A validálás L^* értékei a referencia Color Lite műszerrel és a látórendszerrel mérve.

L^*	Color Lite		Látórendszer	
	átlag	szórás	átlag	szórás
Narancs	52,73	0,35	65,73	2,27
Zöldalma	53,18	2,39	63,03	3,43
Banán sárga része	65,44	1,59	72,00	4,39
Banán barna része	26,51	0,26	30,52	4,07
Padlizsán	16,38	0,36	24,52	4,17
Paprika (piros)	24,33	1,52	44,22	4,00
Paprika (sárga)	37,56	3,34	76,56	2,61

19. ábra: A validálást jellemző közelítő egyenes a látórendszer és a referencia műszer által mért L^* értékek közötti korreláció vizsgálatára.

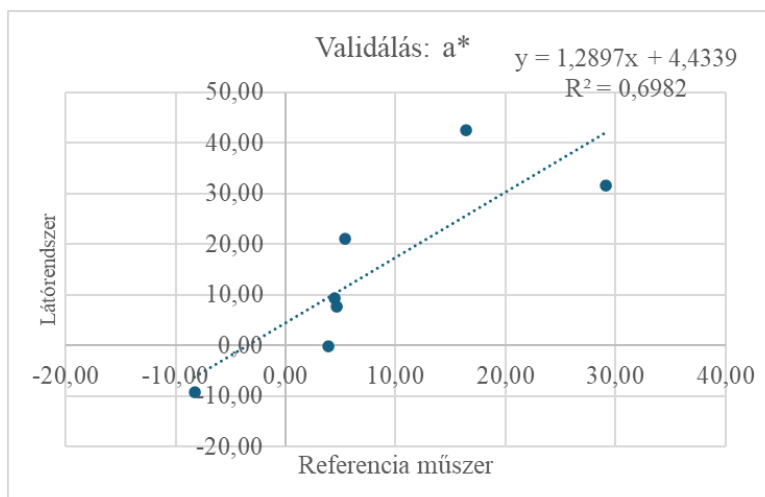


Az a^* esetében az 20. ábrán látható módon az alacsonyabb értékeknél alábecsülte a magasabb értékeknél pedig felül becsülte a látórendszer a mintákat, az egynél nagyobb meredekség pedig arra utal, hogy abszolút értékben nagyobb értékek fele tendált a látórendszer, élénkebbre vette a színeket.

2. táblázat: A validálás a^* értékei a referencia Color Lite műszerrel és a látórendszerrel mérve.

a^*	Color Lite		Látórendszer	
	átlag	szórás	átlag	szórás
Narancs	29,07	1,54	31,62	4,11
Zöldalma	-8,28	0,47	-9,16	2,37
Banán sárga része	4,42	6,24	9,22	2,84
Banán barna része	4,61	0,54	7,57	4,21
Padlizsán	3,86	0,45	-0,18	2,79
Paprika (piros)	16,38	1,94	42,53	5,37
Paprika (sárga)	5,40	1,03	20,96	2,75

20 ábra: A validálást jellemző közelítő egyenes a látórendszer és a referencia műszer által mért a^* értékek közötti korreláció vizsgálatára.

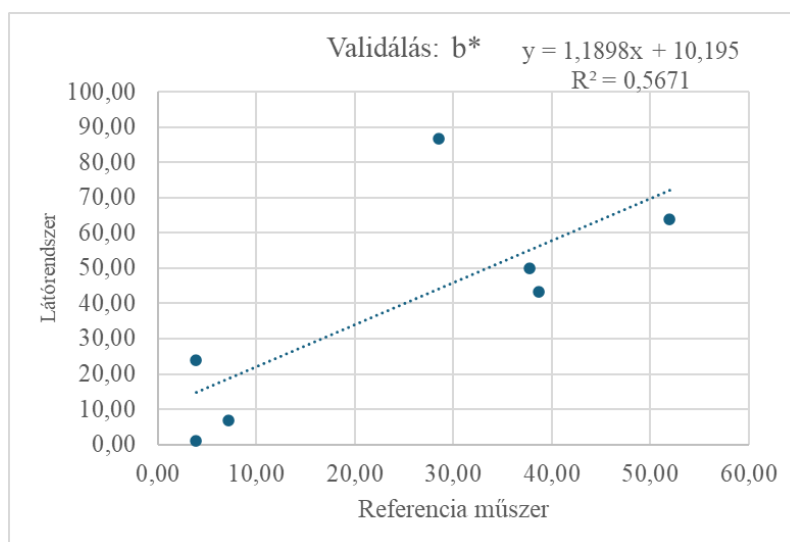


Végül a b^* esetében is nagyobb eltérések voltak láthatóak, a kiugró érték a sárga színű paprika (21. ábra). A látórendszer itt is minden közel értéket magasabbra vett, mint a referencia. Továbbá érdemes kiemelni, hogy a vizsgált minták mindegyike pozitív b^* értékekkel rendelkezik, hasonlóan az élelmiszerek nagytöbbségéhez. A kalibráció során viszont kék árnyalatú színfoltok is jelen voltak. Feltehetjük tehát a kérdést, hogy jobb eredményeket tudunk volna elérni, hogyha csak olyan színfoltokkal kalibrálunk, amelyek a mérendő tartománya estek? A validáció során olyan kékes árnyalattal rendelkező élelmiszereket is vizsgálatba lehetett volna venni, amelyek telítettebbek, mint a kísérlet során használt padlizsán.

3. táblázat: A validálás b^* értékei a referencia Color Lite műszerrel és a látórendszerrel mérve.

b^*	Color Lite		Látórendszer	
	átlag	szórás	átlag	szórás
Narancs	51,94	2,38	63,79	12,31
Zöldalma	38,67	3,02	43,42	7,66
Banán sárga része	37,73	6,24	50,06	6,35
Banán barna része	7,17	0,41	6,79	4,05
Padlizsán	3,87	0,92	1,14	2,69
Paprika (piros)	3,87	0,92	23,81	7,13
Paprika (sárga)	28,49	2,74	86,70	13,35

21. ábra: A validálást jellemző közelítő egyenes a látórendszer és a referencia műszer által mért b^* értékek közötti korreláció vizsgálatára.



A színkülönbség értékeket az 4. táblázat mutatja, melyből látszik, hogy a legkisebb (de még mindig relatíve nagy) hibával a sötétebb termények mérése történt. Az előbbieken feltárt okok közül erre magyarázatul szolgálhat az az észrevétel, hogy túlbecsüli a telítettséget a látórendszer, és ennek okán a sötétebb, ez által alacsonyabb abszolút értékű telítettséggel rendelkező minták kisebb hibát mutatnak.

4. táblázat: A validáció során mért színekülönbség értékek (ΔE^*) a referencia és a látórendszer között.

	ΔE^*
Narancs	17,78
Zöldalma	10,97
Banán sárga része	14,77
Banán barna része	5,00
Padlizsán	9,50
Paprika (piros)	38,43
Paprika (sárga)	71,77

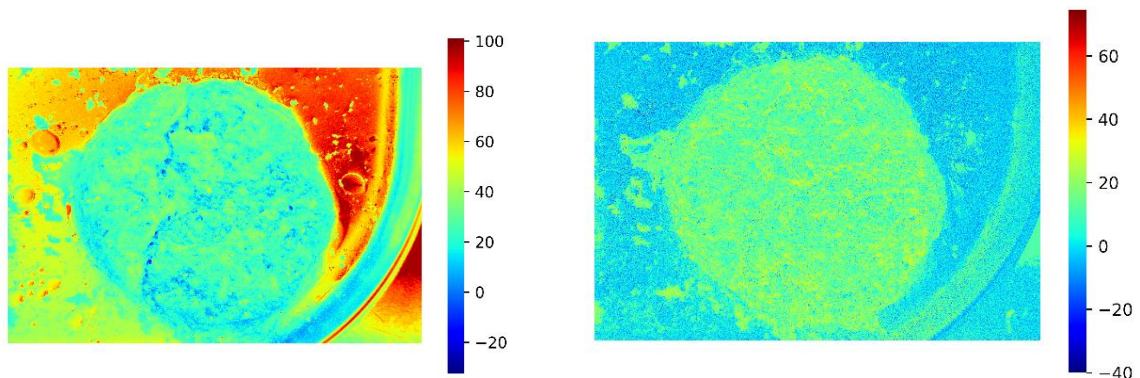
4.2.2 Laskagombatartalmú húspogácsák színmérése

A látórendszert teszteltem egy a fentieknél kevésbé jól kontrolált környezetben is. Az 4. képen látható egy tipikus húspogácsa. A háttér összetettsége és az alanytól való kevésbé jelentős elhatárolhatósága nehezebbé tette a kép szegmentálását. Az 22. és 23. ábrákon láthatóak a pseudo-színes képek melyek az L^* a^* b^* értékeket ábrázolják. Az 24. ábrán látható, hogy a referencia műszer által mért értékek az egy és két szigma távolságra esnek a látórendszer átalgától, ami alacsonyabb pontosságra utal.

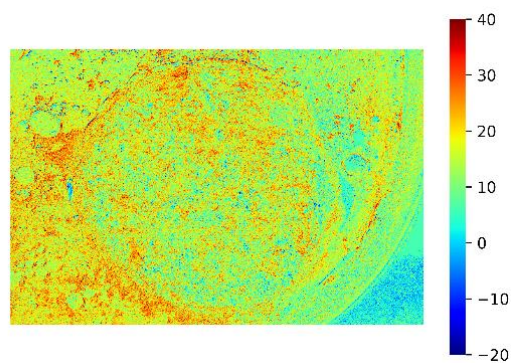
4. kép: 35% laskagomba és 15% zsírtartalmú marhahúspogácsa.



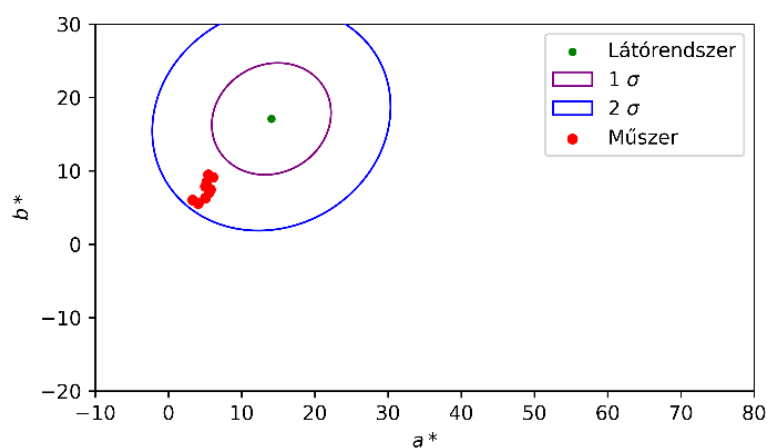
22. ábra: A marhahúspogácsa látórendszer által mért Lab értékei balról jobbra: L^* , a^* .



23. ábra: A marhahúspogácsa látórendszer által mért b^* értékei.



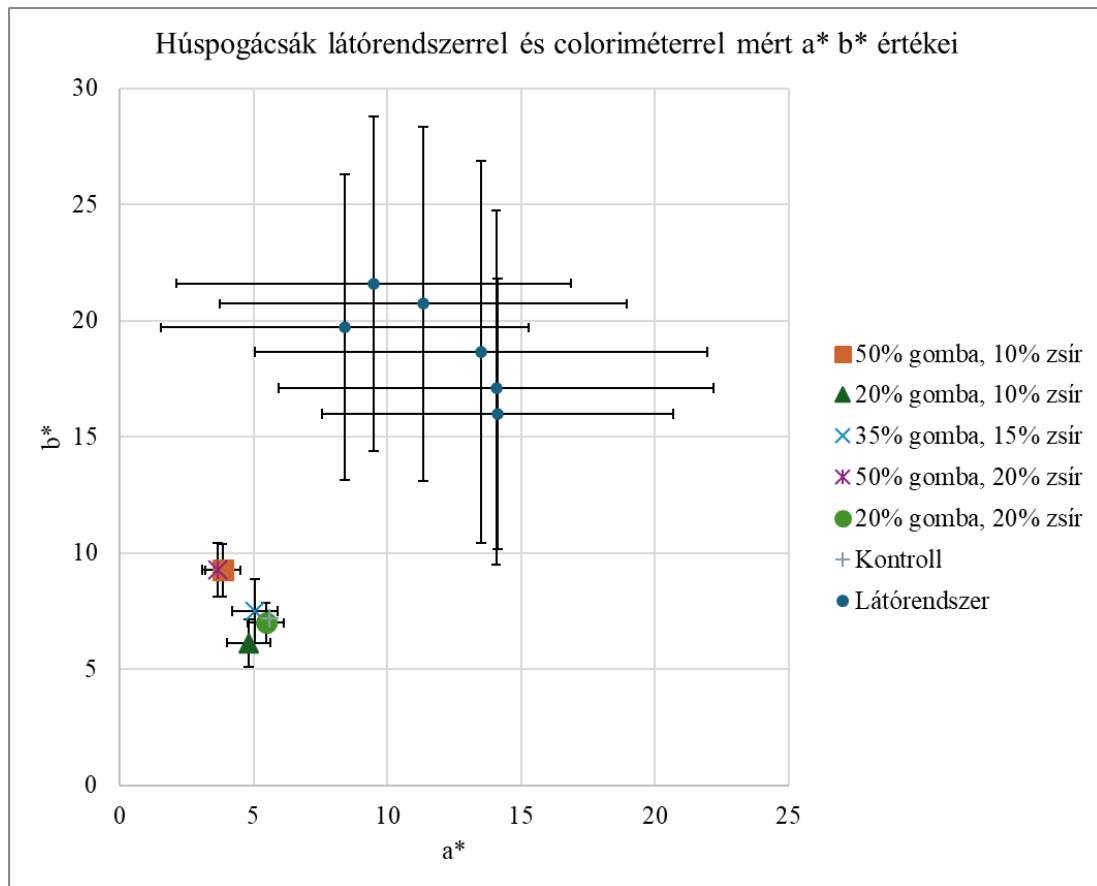
24. ábra: A marhahúspogácsa a látórendszer (zölddel átlag, lilával 1σ szórás, kékkel 2σ szórás) és a referencia műszer (piros) által mért értékeinek a^* b^* vetülete.



Az 25. ábrán pedig egyszerre van ábrázolva az összes különböző összetételű húspogácsa a^* b^* értékei a látórendszer által mért értékekkel és 1 szigma szórással. A koloriméterrel által mért adatokból elhatárolható a két minta melyeknek magasabb a gombatartalma, míg a

látórendszer adatai olyan mértékben fedik egymást, hogy nem lehet szignifikáns különbséget kijelenteni. A mérések nagy átfedésének oka lehet, hogy a látórendszer a teljes színezetet írja le, amely a felszín összetettségével változhat. Annak ellenére, hogy a koloriméterrel is több pontban mérünk mégis kisebb szórással rendelkeznek.

25. ábra: A marhahúspogácsák koloriméterrel és látórendszerrel mért színezetének a^* b^* vetülete.



5. Következtetések és javaslatok

A látórendszeres kamrában általános színezet mérésére alkalmas a rendszer, de a koloriméterrel összevetve jelentősen nagyobb szórással rendelkezik. A látórendszeri szórás nagysága adódhat a vizsgált minta felszíni változatosságából (lásd: zöldalma mintázata). Amennyiben a felszint részekre osztással próbáljuk jellemezni, kritikus a megfelelő határértékek megválasztása, kifejezetten gradiens színátmenetekkel rendelkező alanyok esetében (lásd: banán), mert a nemmegfelelő szétválasztás torzítja az eredményeinket. A színetalon foltjai mind matt felületűek, viszont a vizsgált minták fényesebbek. Ez részben magyarázatul szolgálhat a kalibrációtól való erős eltérésre. Egy másik forrása a látórendszer nagyobb szórásának az alkalmazott szintér vizuális egyenetlensége. Érdeemes lehetne megvizsgálni a mintákat a 2.1.2-es pontban említett OKLab szintér alkalmazásával. A két mérési technika két külön cél elérésében segíthet, illetve egymás hátrányait képesek kiküszöbölni.

A húspogácsák megkülönböztetésére az általános színezet vizsgálata helyett, a felületi mintázat eltérései jobb eredményeket adhatnak. Az kutterezés után esetlegesen megmaradt nagyobb gombadarabok világosabb színűek. Ez alapot adhatna a mintázatok összehasonlítására, azok homogenitása alapján. Ez előrevetíti, hogy olyan látórendszeres mérési módszereket kell ilyen esetekre kidolgozni, amelyek kombinálják a színmérési és a morfológiai mérések által adott értékeket, és így egy komplex leírást adnak a vizsgált alanyról. Az általam alkalmazott kamera képes nagymennyiségű adat gyors felvételére a magas felbontással a kisebb részletek is kivehetőek, de a színmérés esetében nem szükséges ilyen nagymennyiségű adat, főleg egy alanyról. Amennyiben a felvételi környezet megengedi, akár több alanyról is lehetne egyszerre felvételt készíteni, de ennek feltétele lenne egy olyan optika alkalmazása, amely torzításai és képhibái elhanyagolhatóak a kép szélein is. A magas felbontás viszont kimondottan előnyös lenne a mintázat vizsgálatánál.

A jelenlegi rendszert fejleszteni lehetne több irányba is: Amennyiben a felvételi környezet a fényviszonyok és háttér nem állandó, gyakran változik, vaku használata segíthet a megfelelő és állandó megvilágítási körülmények megvalósításában, amennyiben állandó az alanytávolság. A fényes felületrészek kiszűrésére érdemes lehet kereszt-polarizált rendszerekkel kísérletezni, ezek csak a diffúz visszaverődést rögzítenék. A „real-time” vonalmenti megvalósítás vizsgálata, mozgóképek kiértékelése is egy érdemes fejlesztési terület lehet.

6. Összefoglalás

A diplomamunkám céljának azt tűztem ki, hogy egy látórendszert tervezzek és méréseket valósítsak meg vele, kifejezetten a színmérés terén. A szakirodalomból gyűjtött és az ezt megelőző egyetemi tanulmányaim alatt szerzett tudásom alapján, mérési módszert alakítottam ki és validáltam, teszteltem különböző környezetekben.

Az általam elvégzett kísérleteket egy fogyasztói kamera (Sony ZV-E10) köré épülő látórendszerrel folytattam. A kamera által rögzített felvételek szegmentálása HSV színtérben történt, kalibrálásuk és kiértékelésük pedig a CIE $L^*a^*b^*$ színtérben. A szoftveres háttér nyílt forráskódú python könyvtárak segítségével végeztem, a kalibrációhoz 24 színfolttal rendelkező színetalont, valamint referencia kolorimétereket használtam melyet az egyetem tanszékei biztosítottak. A kalibrációs egyenletet egy szakirodalmi forrásból emeltem ki és a saját alkalmazásomra módosítottam. A kalibráció sikeres volt, a színetalnon referencia műszer által mért értékektől való eltérés mérsékelt ($\Delta E^* = 3,0$). A kalibráció a kék és kékeszöld árnyalatú színfoltok esetében volt a leggyengébb.

A validálási lépést 6 különböző színezetű termény mérésével végeztem. Általánosan elmondható, hogy a látórendszer a referenciához képest nagyobb szórással rendelkezett és telítettebb és világosabb színeket mért átlagosan. A fényesebb felületek visszaverődése a globális színezetre nagy hatással volt és ez a látórendszer sajátossága, a koloriméterek mérését nem befolyásolja. A színetalon foltjai matt felszíne és a mért termények fényes felszíne közötti eltérés is hozzájárulhatott a mért értékek eltérésébe. Összeségében a validáció során több fontos tényezőt sikerült feltárni, amely a látórendszer koloriméterrel való összeegyeztetéséhez kulcsfontosságú.

A látórendszert alkalmazhatóságának határait vizsgálva egy szuboptimális környezetben is végeztem mérést. Két szaktársam által folytatott kísérlet sorozatban laskagomba tartalmú marhahúspogácsákat készítettek és vizsgáltak. A látórendszer mobilitását kihasználó próbaként a frissen készített húspogácsákról felvételeket készítettem, a helyiség megvilágításhoz színetalonnal viszonyodva. További cél volt a felderíteni, hogy a különböző gombatartalmú húspogácsák globális színezet alapján megkülönböztethetőek-e. A kalibráció hasonló eredménnyel sikerült, mint a fent említett mérésnél. A kiértékelés során a látórendszer ismét magas szórással rendelkezett, a húspogácsák felületének csillanása, összetettsége miatt, emiatt nem lehetett a látórendszer adatai alapján szignifikáns különbséget megállapítani. A húspogácsák megkülönböztetésére érdemes lehet mintázat

elemzéssel kombinált színmérés. Ez a kísérlet ismételten demonstrálta a látórendszer koloriméterhez való egyeztetésének nehézségeit, a megvilágítás az alany morfológiai és fényvisszaverő tulajdonságainak fontosságát. Az itt kapott eredmények alapján a módszer fejlesztésének lehetőségeit is megállapítottam. Az állandó és ismert megvilágítás elérésében vaku, vagy hasonló hordozható világítás tud segíteni. A fényes felületek kiszűrését kereszt polarizációval lehetne megoldani, de ennek a hatása a koloriméterrel való összeegyeztethetőségre nem egyértelmű. További fejlesztési irányt jelenthet mozgóképek hasonló elemzése, akár „real-time” megoldásban, ami alapját képezheti egy gyors üzemi rutinmérési módszernek.

Köszönetnyilvánítás

Szeretném ezúton is megköszönni Dr. Baranyai Lászlónak a témavezetést, a szakmai tanácsokat és a műszerek használatának bemutatását. Valamint köszönöm Kovács Levente és Méhes Attila Dénes szaktársaimnak, hogy az általuk folytatott kísérletek során előállított hűspogácsákat saját méréseimben is felhasználhattam.

Irodalomjegyzék

- A. Voggu, M. R. (2024). CosinePrism: An Unequal Error Protection Scheme for Progressive Image Transmission Over Half-Duplex Channels. *International Conference on Signal Processing and Communications (SPCOM)*, 1-5, doi: 10.1109/SPCOM60851.2024.10631588.
- Bayer, B. E. (July 1976). *Color imaging array*. U.S. 3 971 065A.
- Benjdira Bilel, A. A. (2020). Data-Efficient Domain Adaptation for Semantic Segmentation of Aerial Imagery Using Generative Adversarial Networks. *Applied sciences*, DOI: <https://doi.org/10.3390/app10031092>.
- Cao, D. (2013). Chapter 10 - Color Vision and Night Vision. In S. J. Ryan, *Retina* (old.: 285-299, DOI:<https://doi.org/10.1016/B978-1-4557-0737-9.00010-2>).
- Fernando Mendoza, P. D. (2006). Calibrated color measurements of agricultural foods using image analysis. *Postharvest Biology and Technology Volume 41, Issue 3*, 285-295, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2006.04.004>.
- Firtha F, R. R. (2014). A hús márványozottságának RGB-, hiperspektrális- és CT-képfeldolgozással történő jellemzésének kritériumai. *Acta Agraria Kaposváriensis*, 18. kiadás, 1. szám, 66-75.
- Fossum, E. R. (1997). CMOS image sensors: electronic camera-on-a-chip. *IEEE Transactions on Electron Devices Volume: 44*, 1689-1698 DOI: 10.1109/16.628824.
- Gomes J. F. S., L. F. (2012). Applications of computer vision techniques in the agriculture and food industry: a review. *Eur Food Res Technol*, 989-1000.
- Guild, J. (1931). The colorimetric properties of the spectrum. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 149–187 DOI: <http://doi.org/10.1098/rsta.1932.0005>.
- Gunasekaran, S. (1996). Computer vision technology for food quality assurance. *Trends in Food Science & Technology*, 245-256.
- Holst, G. C. (1998). *CCD Arrays, Cameras and Displays*. Society of Photo Optical.
- Kuehni, R. G. (1998). Hue uniformity and the CIELAB space and color difference formula. *Color Res. Appl.*, 314-322, DOI: [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1520-6378\(199810\)23:5<314::AID-COL7>3.0.CO;2-Z](https://doi.org/10.1002/(SICI)1520-6378(199810)23:5<314::AID-COL7>3.0.CO;2-Z).
- Kwan Chiman, B. C. (2019). Comparison of Deep Learning and Conventional Demosaicing Algorithms for Mastcam Images. *Electronics* 8, 308, DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics8030308>.

- L. Fascione, J. H. (2024). A study of observer metamerism for reflectance-induced. *Joint Workshop on Material Appearance Modeling and MANER Conference*.
- Lien Nguyen, V. A. (2020). Application of hue spectra fingerprinting during cold storage and shelf-life of packaged sweet cherry. *Journal of Food Measurement and Characterization*, DOI: 10.1007/s11694-020-00515-z.
- Ma, J. S. (2015). Applications of Computer Vision for Assessing Quality of Agri-food Products: A Review of Recent Research Advances. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 113-127, DOI: <https://doi.org/10.1080/10408398.2013.873885>.
- Menesatti, P., Angelini, C., Pallottino, F., Antonucci, F., Aguzzi, J., & Costa, C. (2012). RGB Color Calibration for Quantitative Image Analysis: The “3D Thin-Plate Spline” Warping Approach. *Sensors* 12, no. 6, 7063-7079, DOI: <https://doi.org/10.3390/s120607063>.
- Menon Daniele, C. G. (2011). Color image demosaicking: An overview. *Signal Processing Image Communication*, 518-533, DOI:10.1016/j.image.2011.04.003.
- Ottoson, B. (2020). A perceptual color space for image processing. <https://bottosson.github.io/posts/oklab/>.
- S. Warchol, J. T. (2024). psudo: Exploring Multi-Channel Biomedical Image Data with Spatially and Perceptually Optimized Pseudocoloring. *Computer Graphics Forum*, 43, e15103 DOI: <https://doi.org/10.1111/cgf.15103>.
- Sandro M. Goñi, V. O. (2017). Color measurement: comparison of colorimeter vs. computer vision system. *Food Measure* 11, 538–547.
- Tadhg Brosnan, D.-W. S. (2004). Improving quality inspection of food products by computer vision—a review. *Journal of Food Engineering*, Volume 61, Issue 1, 3-16, DOI:[https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(03\)00183-3](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(03)00183-3).
- Tian H., T. W. (2020). Computer vision technology in agricultural automation —A review. *Information Processing in Agriculture*, Volume 7, Issue 1, 1-19, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2019.09.006>.
- Waltham, N. (2013). CCD and CMOS sensors. In M. P. Huber, *Observing Photons in Space. ISSI Scientific Report Series*, vol 9. (old.: 423-442, DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4614-7804-1_23). New York, NY.: Springer.
- Wright, W. D. (1929). A re-determination of the trichromatic coefficients of the spectral colours. *Transactions of the Optical Society*, Volume 30, Number 4, 141, DOI: 10.1088/1475-4878/30/4/301.