



Élelmiszertudományi Kar

**Trikromatikus és hiperspektrális
képfeldolgozási módszerek
élelmiszerek és termények vizsgálatára**

Firtha Ferenc

Doktori értekezés

Budapesti Corvinus Egyetem
Élelmiszertudományi Kar
Fizika-Automatika Tanszék

Budapest, 2008

A doktori iskola

megnevezése: Élelmiszertudományi Doktori Iskola

tudományága: Élelmiszertudományok

vezetője: Dr. Fodor Péter
tanszékvezető egyetemi tanár, DSc
BCE, Élelmiszertudományi Kar
Alkalmazott Kémia Tanszék

témavezető: Dr. Felföldi József
tanszékvezető egyetemi tanár, PhD
BCE, Élelmiszertudományi Kar
Fizika-Automatika Tanszék

A jelölt a Budapesti Corvinus Egyetem Doktori Szabályzatában előírt valamennyi feltételnek eleget tett, az értekezés műhelyvitájában elhangzott észrevételeket és javaslatokat az értekezés átdolgozásakor figyelembe vette, azért az értekezés nyilvános vitára bocsátható.

.....
A témavezető jóváhagyása

.....
Az iskolavezető jóváhagyása

A Budapesti Corvinus Egyetem Élettudományi Területi Doktori Tanácsának 2008. június 10-ki határozatában a nyilvános vita lefolytatására az alábbi bíráló Bizottságot jelölte ki:

BÍRÁLÓ BIZOTTSÁG:

Elnöke

Békássyné Molnár Erika, DSc

Tagjai

Deák Tibor, DSc

Farkas István, DSc

Láng Zoltán, CSc

Lénárt Csaba, PhD

Opponensek

Seres István, PhD

Szabó István, PhD

Titkár

Baranyai László, PhD

Tartalomjegyzék

1	BEVEZETÉS	1
2	IRODALMI ÁTTEKINTÉS	3
2.1	TRIKROMATIKUS KÉPFELDOLGOZÁS	3
2.1.1	<i>Képfeldolgozás hardver-eszközei</i>	5
2.1.2	<i>Szegmentálás, korrekció, alakleírás</i>	8
2.1.3	<i>Színmérés</i>	11
2.2	HIPERSPEKTRÁLIS KÉPFELDOLGOZÁS	19
2.2.1	<i>Sárgarépaszövetek nedvességtartalmának mérése</i>	21
3	CÉKITŰZÉSEK	22
3.1.1	<i>Trikromatikus módszer célkitűzései</i>	22
3.1.2	<i>Hiperspektrális módszer célkitűzései</i>	24
4	ANYAG ÉS MÓDSZER	25
4.1	TRIKROMATIKUS KÉPFELDOLGOZÁS	25
4.1.1	<i>Méréselrendezés, hardver</i>	25
4.1.2	<i>Szoftver-környezet, alaprutinok</i>	27
4.1.3	<i>Fejlesztett célalgoritmusok</i>	30
4.1.4	<i>Kalibrálás</i>	33
4.2	HIPERSPEKTRÁLIS KÉPFELDOLGOZÁS	39
4.2.1	<i>Rendszer-fejlesztés</i>	39
4.2.2	<i>Kalibrálás, stabilitás biztosítása</i>	41
4.2.3	<i>Előfeldolgozás, valós idejű adatredukció</i>	46
4.2.4	<i>Alkalmazás répaszövetek nedvességtartalmának becslésére</i>	48
5	EREDMÉNYEK	54
5.1	SZEGMENTÁLÁS	55
5.1.1	<i>Kiválasztás, festés, zajsűrés, morfológia</i>	55
5.1.2	<i>Kiválasztás hatékonyságának javítása statisztika alapján</i>	57
5.1.3	<i>Klaszter-analízis automatikus és tanulómintás alkalmazása</i>	59
5.1.4	<i>Egyéb lokális kiválasztási módszerek</i>	61
5.1.5	<i>Szegmentálási módszerek alkalmazásai</i>	63
5.2	FELÜLETJELLEMZÉS: SZÍN, LÉNYEGKIEMELÉS, MINTÁZAT	65
5.2.1	<i>Színmérés feltételeinek biztosítása</i>	65
5.2.2	<i>Térbeli kiterjedés hatásának korrigálása</i>	69
5.2.3	<i>Lényegkiemelés, statisztika</i>	75
5.2.4	<i>Mintázat speciális jellemzése</i>	77
5.2.5	<i>Felületjellemzés alkalmazása élelmiszerek minősítésére</i>	79

5.3	ALAK LEÍRÁSA	81
5.3.1	<i>Leírás Fourier transzformációval.....</i>	82
5.3.2	<i>Periodikus részletek leírása.....</i>	84
5.3.3	<i>Objektum-csoport leírása cél-függvény segítségével.....</i>	87
5.3.4	<i>Struktúra általános leírása, görbült topológia.....</i>	90
5.3.5	<i>Alakleírás alkalmazásai.....</i>	94
5.4	HIPERSPEKTRÁLIS MÉRŐRENDSZER ALKALMAZÁSA RÉPASZÖVETEK VIZSGÁLATÁRA	96
5.5	ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK	106
6	KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK	108
7	ÖSSZEFOGLALÁS (SUMMARY).....	109
8	KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS	111
9	MELLÉKLETEK	112
9.1	IRODALOM-JEGYZÉK	112
9.2	PUBLIKÁCIÓK, HIVATKOZÁSOK, EGYÉB SZAKMAI TEVÉKENYSÉG.....	118

1 Bevezetés

Tanszékünkön élelmiszerek, például termények, gyümölcsök, zöldségek, gabonafélék fizikai paramétereit vizsgáljuk. A fizikai paraméterek felhasználhatók osztályozási, minőségellenőrzési és automatizálási feladatokban, mérésük általában gyorsabb, mint más, például kémiai összetevők mérése. A megfelelően választott reológiai, elektromos, termodinamikai, vizuális, stb. jellemzők akár együtt, többváltozós statisztikai analízis vagy mesterséges neuronhálók bemenő paramétereként adhatják a megfelelő célfüggvényeket.

A fizikai mérések közül különösen a gyors, roncsolás-mentes, esetleg laboratóriumi körülményeket nem igénylő mérések fontosak, mint amilyen a vizuális paraméterek mérése. A terményeket sok esetben jól jellemzi azok színe, alakja, felülete. Egy felület színét mérhetjük színinger-mérő műszerrel vagy spektroszkóppal. Ezen eszközök azonban egy adott felületre integrálnak, így nem írhatják le az állati- és növényi struktúrák esetén jellemző inhomogenitást, a textúrát és alaki jellemzőket.

A számítógépes látórendszer alkalmas a szín hely szerinti eloszlásának mérésére. Képfeldolgozó mátrix- illetve soros eszközzel minden egyes képpontra kaphatunk szín információt. Megfelelő méréselrendezéssel és mérésutasítással biztosítható a szükséges jelszint és a mérés stabilitása. Megfelelő képfeldolgozó algoritmusokkal kiválasztható a vizsgálandó objektum, leírható annak színe, felülete és alakja.

Az utóbbi években, a távérzékelésben elterjedt hiperspektrális mérési eszköz már a laboratóriumi munkában is elérhető. Az eszköz alkalmas adott tartományú (pl. látható- vagy infravörös) spektrum hely szerinti eloszlásának mérésére. Mivel a spektrum alapján akár beltartalmi jellemzőkre is lehet következtetni, a módszer jelentős sikereket ígér az ipari automatizálási- és laboratóriumi minőségellenőrzési célfeladatokra használt multispektrális mérések megalapozó kutatásban.

Mind a látórendszeres, mind a hiperspektrális mérés-típus speciális ipari- illetve laboratóriumi alkalmazását megelőzi a vizsgált objektum és tulajdonság kutatása. Ehhez általános és ugyanakkor hangolható mérési környezet szükséges. Munkámban alapvetően e két képfelvételi eszköz, egy trikromatikus jelet adó professzionális kamera és egy spektrális adatot szolgáltatató hiperspektrális eszköz használatának mérés-technikai feltételeit kívánom megvizsgálni. Milyen hardver eszközök és szoftver algoritmusok szükségesek a trikromatikus- és spektrális képfeldolgozás alkalmazásához élelmiszerek vizsgálatára a kutatásban, minősítésére a laboratóriumban?

- Milyen szoftver eszközök szükségesek a szenzorok és egyéb perifériák valós idejű vezérléséhez, az RGB jel előfeldolgozásához? Milyen mérésutasítással, kalibrációs eljárással biztosítható a színméréshez szükséges jelszint, stabilitás és reprodukálhatóság? Milyen szoftver eszközökkel segíthető a kalibrálás és méréssorozat folyamata.
- Milyen általános, ugyanakkor hangolható szegmentálási algoritmusokat lehet alkalmazni a különböző színű és alakú élelmiszerek, termények, résztartományok kiválasztására? Lehet-e javítani az automatikus módszerek hatékonyságán, adaptálni a speciális kiválasztásra alkalmas, tanulómintás algoritmusokat? Milyen eljárásokkal lehet valós időben feldolgozni a kiválasztott képpontokat és csökkenteni a szegmentáció zaját?
- Milyen feltételek teljesülése esetén konvertálható a mért RGB jel szabványos CIE színrendszerbe? A mért RGB jelre milyen hatással van az objektum geometriai kiterjedése és a megvilágítás, azaz a mért jel milyen függvénye a beesési és visszaverődési szögeknek? A felületjellemzés milyen egyéb módszerei (lényegkiemelő operátorok, textúra jellemzése) alkalmazhatók élelmiszerek vizsgálatára?
- Milyen algoritmusokkal jellemezhetőek egy objektum alakjának alapvető, szimmetrikus tulajdonságai (méret, nagy- és kistengely, orientáció)? Milyen módszerrel lehet, objektumcsoport alakját szakértői rendszerben is használható paraméterekkel leírni? Milyen algoritmussal lehet termények alakját morfológiailag leírni, kiküszöbölni a görbült topológiát?
- Milyen algoritmusok és szoftver környezet szükséges a hiperspektrális képfeldolgozó módszer, kutatási-, laboratóriumi alkalmazásához, a jelszint, a stabilitás és reprodukálhatóság biztosításához?
- Élelmiszerek laboratóriumi mérése esetén hogyan lehet a mérésenként gigabájtnyi spektrális adatot (adatkockát), a vizsgált jellemzők eloszlásának valós idejű kiemelésével radikálisan csökkenteni?
- A rendszer alkalmazásaként meghatározható-e növény különböző szöveteinek víztartalomcsökkenése hiperspektrális mérés alapján?

Dolgozatom mérés-technikai, módszertani jellegű, ami meghatározza az egyes főbb fejezetek arányát. Eredményként kívánom elszámolni saját algoritmusaimat, ami más esetben az „Anyag és módszer” fejezetet bővítené.

A fejezetek természetes bontását adják, hogy két különböző képfeldolgozási módszer alkalmazhatóságát kívánom leírni. A 15 éve fejlődő „trikromatikus” (hagyományos RGB alapú) képfeldolgozást és az utóbbi években, az élelmiszerek kutatásában megjelenő hiperspektrális képfeldolgozást.

2 Irodalmi áttekintés

2.1 Trikromatikus képfeldolgozás

Míg a képfeldolgozás módszereit kezdetben főként az űr- és haditechnikában alkalmazták, a képfellevő-, digitalizáló- és számítástechnikai eszközök fejlődésével és popularizálódásával, napjainkban egyre szélesebb körben elterjedtek az automatizálási-, minőségellenőrzési-, biztonságtechnikai- feladatoknál. Néhány példa a már elterjedt algoritmusokra:

- Recognita karakter-felismerő program (magyar):

Nyomatott karakterek felismerése történhet a betűk bitképének (pattern) illesztésével, a minták lineáris transzformációival (nyújtás, forgatás), vagy mesterséges neuron-hálóval.

- Falcon rendszám-felismerő rendszer (magyar):

A táblák pozíciójának meghatározását könnyítették meg a néhány éve általánosan bevezetett fekete keretű rendszám táblákkal. A szükséges geometriai transzformációk után következik a karakterfelismerés, majd a keresés egy on-line adatbázisban. A feladat sebességigénye kiemelkedő.

- Palackok ellenőrzése mosó-, visszaváltó automatákban:

Ipari automatizálási feladatnál gyakori az algoritmus cél-specifikus leegyszerűsítése. Palackok azonosításához a szoftver csak a kép bizonyos szakaszai mentén vizsgálja a méretet (palack teteje, nyak két oldala, has két oldala) és dönti el a palack típusát és minőségét.

- Csavarmenetek ellenőrzése:

Autóipari alkalmazásban, 10 000 1/perc fordulatszámmal forgó csavarok menetét úgy ellenőrzik, hogy a palást vizsgált képtartományát leszűkítik, ezzel csökkentve a kamerától szállítandó és feldolgozandó adatfolyam méretét.

- Gépjárművek helyzetérzékelése:

Gépjárművek GPS rendszere mellett lokális helyzet-meghatározása is történhet képfeldolgozással, pl. beépített kamerák sztereo-képe alapján figyelmeztetheti a vezetőt a fedélzeti komputer, ha a jármű túl közel került egy tereptárgyhoz vagy egy másik autóhoz.

- Szedő-automaták:

Az objektum-felismerés egyik legnehezebb területe, mivel a termények „in vivo” megvilágítási körülmények között szín alapján nehezen szegmentálhatók, sőt takarásban is lehetnek.

- Egyebek:

Izzószálak ellenőrzése (Tungstam), vonalkódok (pl. EAN 13), ujjlenyomatok-, írisz azonosítása, stb. Sokáig lehetne folytatni a hétköznapi életben megjelenő alkalmazásokat.

Az élelmiszerekről szóló 1976. évi IV. törvény („élelmiszer törvény”) rendelte el a Magyar Élelmiszerkönyv létrehozását az élelmiszerek előállításának részletes szabályozására. Az 1990-es gazdasági-társadalmi eseményekkel a Magyar Élelmiszerkönyv Bizottság feladatként tűzte ki az Európai Gazdasági Közösség előírásaihoz való igazodást. Az 1994-ben létrehozott és azóta folyamatosan fejlesztett Magyar Élelmiszerkönyv (Codex Alimentarius Hungaricus, 1994) három kötete részletes leírást tartalmaz az egyes élelmiszerek minőségi előírásairól, az irányelvekről és a mérési módszerekről.

2004. május 1. után a dokumentum szerepe annyiban változott, hogy az Uniós csatlakozás miatt nem vesz át többé EU rendeleteket, mert azok az EU tagság után közvetlenül alkalmazandóak. Így az I. Kötet kötelezően alkalmazandó előírásai közé a magyar fogyasztók és a gazdaság számára különösen fontos termékek követelményei is bekerülhetnek. A piaci elvárások jelentős szigorítása miatt érthető tehát, hogy mind az élelmiszertudományban, mind az iparban, fokozottan megnőtt az igény az élelmiszerek, termények minőségének kvantitatív leírására, mérésére.

A képfeldolgozás nyújtotta gyors, roncsolás-mentes mérési módszer két alapvetően fontos területen alkalmazható. Az automatizálási feladatokban és a minőség-ellenőrzés területén.

Az ipari automatizálási alkalmazások, a nagy sebesség-igény és a költség minimalása miatt általában speciális, egyszerűsített algoritmusokat alkalmaznak. A mérésből számított paraméterek a döntést szolgálják, nem feltétlenül értelmezhetők.

Komplex minőség-ellenőrzési feladatokra (pl. fajtaazonosítás) szakértői rendszer használható, amelynek döntési algoritmusát általában szoftveresen hangolható figyelembe véve az újabb kutatási eredményeket. A rendszer által nyert paraméterek sok esetben azonosak a humán szakértő által hagyományosan használt paraméterekkel.

Mind az automatizálási, mind a minőségellenőrzési alkalmazási terület igényli a mérendő objektumtípus, adott optikai tulajdonságra vonatkozó előzetes kutatását. Az előzetes mérések statisztikai analízisével választható ki az adott alkalmazásnak megfelelő módszer. A kutatást, az ilyen előzetes méréseket lehetővé tevő környezet (méréselrendezés és algoritmusok), a sokrétű felhasználás érdekében általános és ugyanakkor hangolható kell, hogy legyen. Olyan mérési környezet, algoritmusok, szoftver komponensek kidolgozása szükséges, amelyekkel különféle élelmiszerek és nyersanyagaik kutatása lehetséges. Ehhez a kutatási célú mérési környezet három szükséges algoritmikus lépését kell megvizsgálni:

- a vizsgált objektum képpontjainak általánosan alkalmazható szegmentációját
- a mérés stabilitásának, a színtérbe való konverzióknak feltételeit
- az alakleírás általános és cél-specifikus módszereit

2.1.1 Képfeldolgozás hardver-eszközei

Képfelvételi eszköz: A képfeldolgozás őskorában, az 1950-es években (terem méretű számítógépek, űrkutatási- és haditechnikai alkalmazások) a már kialakult TV technika hagyományos képfelvételi eszköze az **optoelektronikus TV-kamera** volt. A képet optikával félvezető lemezre leképezve, az azzal párhuzamosan elhelyezkedő tárolórétegen a fényességgel arányos töltés keletkezett, amit egy soronként letapogató fénysugárral kisütve kapjuk az ún. egyszerű videó jelet. Az így nyert analóg jel az OIRT és CCIRT szabvány szerint 625 sort ír le, amiből 576 a látható, a többi idő alatt történik a visszafutás és a szinkronjel.

A TV technikában a 4:3 méret-arány használatos, de azt, hogy a szabvány szerinti 625 képpontból soronként mennyi látszik, a leképező eszköz (képcső) felbontása határozza meg. A képminőség javítása érdekében a képet interlace-elven, azaz fésűsen, két félképből teszik össze. A leggyakrabban alkalmazott képfrekvenciák 25 és 30 Hz (PAL/SECAM), mivel a kísérletek szerint 30 Hz körül van az emberi szem ún. fúziós-frekvenciája. Az egyszerű videó jel egy-egy sora, képe után keverik a jelhez a sor- és képszinkron jelet, így kapjuk az összetett, „kompozit” videó jelet. Színes kép esetén a három komponensre (R-G-B) jellemző különálló analóg jel rekonstruálja a képet.

Távolsági analóg jelátvitel sugárzott jele annyiban változik, hogy a fekete-fehér TV készülékek kompatibilitása miatt, az R-G-B jelet világossági és színességi jelre kódolják, majd leképezéskor dekódolják.

A képfelvételi eszközök következő állomása a **CCD** (charge coupled device, 1980) kamerák megjelenése volt. Egy CCD mátrix (amire a leképezés történik) felbontása már soronként és oszloponként is diszkrét, de egy cella jele továbbra is analóg. Szerencsétlen módon a kompozit szabvány miatt ezt a legalább felbontásában digitális jelet a készülékek analóg összetett jellé alakítják. A digitális képfeldolgozásnál, ahol az immár analóg jelet ismét digitalizálni kell, ez adatvesztéssel jár.

A CCD kamerák speciális változata, a szkennerekben, vonalkód-leolvasókban alkalmazott **vonalkamera**. Felbontásuk igen nagy 1024 dpi, 5000 dpi, vagy több is lehet. Ipari automatizálási feladatokban detektorként optimálisan alkalmazható olyan esetekben, ahol a vizsgált munkadarab ismert sebességű translációs mozgásban van (pl. futószalagon mozgatott objektumnál, textilgyártás során a szövési hibák kiszűrésénél, stb.).

Napjainkban, a CCD érzékelők korai riválisa, a **CMOS** (Complementary metal–oxide–semiconductor, 1990) szenzorok is piacra kerültek. A CMOS-t (ellenütemben vezérelt MOSFET-eket tartalmazó logikai áramkört) kis tápigénye és zajvédettsége miatt alkalmazzák előszeretettel statikus memóriának és a technológia fejlődésével mára kedvező áron tudnak előállítani a teljes detektor-mátrixot tartalmazó chipeket. Bár megfelelő tervezéssel mindkét technológia jó minőségű képet adhat, az olcsó CMOS mátrixot használó kamerák minősége általában messze nem éri el a CCD eszközökét, színmérésre nem, legfeljebb mintázat- vagy alakjellemzésre alkalmazhatók.

Az utóbbi évek technikai újdonsága a **digitális fényképezőgép**. A szenzor jelét közvetlenül digitalizálja és a képet memória-kártyára menti valamely tömörített képformátumban. Ezzel kiküszöbölhető a digitális-analóg-digitális átalakítás zaja és a JPEG tömörítés adat-vesztesége (aránya állítható) sem okozhat gondot. Az általában esztétikai célokra tervezett fényképezőgépek színhelyességét, a beállítások rögzíthetőségét már a konkrét típus határozza meg. Ott ajánlható, ahol a képfeldolgozás nem valós időben, képenként történik, hanem a mérésorozat után, kötegelve.

A mérésre alkalmas eszköz ismérvei: szín-stabilitás, fehér-egyensúly objektíven keresztüli beállítása, automatika (fehér-egyensúly, fényerő) kikapcsolhatósága a mérés reprodukálhatóságához, virtuális zársebesség (un. Shutter) állíthatósága és a legtöbb esetben jelentős költség-tényező az optika.

Digitalizáló egység: Analóg jelforrás esetén ennek szerepe, hogy az analóg kompozit jelet mind felbontásra nézve (oszlop szerint), mind színmélységben (RGB komponensek) digitalizálja és azt a számítógép képernyőjének tárterületén (DC, device context: 1,2,4,8,15,16,24,32 bites), illetve parancsra a memóriában (DIB, device independent bitmap: 24 bites) képezze le.

Ez a lépés kikerülhető egy kevésbé igényes USB porton csatlakozó kamerával, de ezen eszközök sebessége, valamint a digitalizálás minősége (színhelyesség, stabilitás, felbontás, sebesség) látványosan rosszabb. Az elmúlt 10 évben a Bt848 és Bt879 (BrookTree) chip-készlettel működő kommersz kártyák özönlötték el a piacot.

Az eszköz kiválasztásának szempontjai a kompatibilitáson túl: Grabber- vagy Capture-kártya állókép illetve film feldolgozására, felbontás, sebesség, overlay, színhelyesség, stabilitás, igényre S-VHS bemenet, videó esetén hardveres tömörítés, lejátszás esetén kompozit kimenet. A képfeldolgozás igénye többnyire mindössze annyi, hogy a szükséges (videó forrástól függő) felbontást 3x8 bites formátumban (DIB) a megfelelő sebességgel és stabilitással, szín-helyesen képezze le a memóriában.

Számítógép: 1986-ban az ELTE TTK számítógépe még egy légkondicionált termet töltött meg, a programokat hetente adták le, operátorok lyukkártyára írták, lefuttatták, majd a hallgatók egy hét múlva kapták meg a futási eredményt. Otthoni felhasználásra már megjelentek a piacon az Atari 400 és 800 (1979: 8 bites 6502C processzor, 4/8 kB RAM), a Commodore gépek (1982: 8 bites MOS 6510 processzor, 1 MHz, 64 kB RAM) és a Sinclair ZX Spectrumok (1982: 8 bites Zilog Z80A processzor, 3,5 MHz, 16 kB ROM, 48 kB RAM), a magyar általános iskolákban a svéd ABC-80 és a magyar HT gépek (1983), igényesebbeknek az Apple Machintos gépe (1984: 16 bites Motorola 68000 processzor, 5/8 MHz, 256 kB RAM, 512x342 pixel monokróm grafikus felület), végül az IBM moduláris architektúrájú XT gépe (1983: 16 bites 8088 processzor, 4.77 MHz, 128 kB RAM, 10 MB HDD, 25x80 szöveges képernyő).

Azóta az IBM XT gépétől eljutottunk a jelenleg átlagosnak mondható 3,2 GHz-es dual processzorig, 1 GB memóriáig (32 bites címzésig), a 400 GB-os háttér-tárolóig és a 3x8 bites színmélységű, harveres 3D támogatást nyújtó monitor-kártyáig és nagy sebességű, egységes portokig (USB 2, LAN, Wi-Fi, Bluetooth). A személyi számítógép teljesítménye mára alkalmassá vált, akár ipari automatizálási feladat képfeldolgozási algoritmusainak megfelelő sebességű futtatására. Eközben jelenlegi ára, összehasonlítva az 1986-os PC árakkal és fizetésekkel, közel nyolcadára csökkent.

Természetesen, mivel a képfeldolgozás algoritmusai szinte elsőnek igényelték a párhuzamos futású programokat (NxN operátok alkalmazása, RGB csatornák, egyéb képjellemzők külön kezelése, stb.), így komolyabb alkalmazásokban a PC továbbra sem versenyezhet a sok-processzoros szupergépekkel (Párhuzamos: Pipelines, Arrays, Pyramids; Neuron: Cellular Logic Arrays) vagy adott feladatot hardveresen megoldó célprocesszorokkal, célgépekkel.

Szoftver: A kutató munkában a hangolhatóság érdekében elengedhetetlen, hardver helyett a feladat szoftveres megoldása.

A szoftveres algoritmusok vertikális lehetőségei a fordított gépközeli nyelvektől (assembly, C), az általános célú magas-szintű (BCB, .NET, Java), a célspecifikus (CA-VO) nyelveken keresztül mára egészen a CAD nyelvekig (Labview, Matlab) terjednek. Az adatfeldolgozásra használható felhasználó-barát környezetek (Maple, Mathcad, Matlab, Ansys, HNC, ...) jó része már egyszerre rendelkezik a forrásszintű kódolás hangolható lehetőségével és a grafikus felület kényelmével. Ezen magas-szintű „interpreteres” környezetek kódja már többnyire C nyelvre exportálható, az alacsony szintű, lefordítható nyelvekre (pl. C, Java) ugyanakkor képfeldolgozó könyvtárakat fejlesztenek (Horus, Halcon). Egy jól választott eszköz-készlettel mára egyszerre kapjuk az alacsony szint flexibilitását és a magas szint kényelmét.

Összegezve, rendkívül sok múlik a komplex feladatra (jelforrás képének digitális képfeldolgozása, majd az eredmény statisztikai értékelése) használt szoftver eszköz-csoport optimális kiválasztásán.

2.1.2 Szegmentálás, korrekció, alakleírás

A digitális képfeldolgozás első lépése és egyik legfontosabb alapproblémája a szegmentáció, azaz a vizsgált objektum képpontjainak (pixel) kiválasztása. A szakirodalom alapvető módszer-csoportjai:

- **Thresholding (küszöbölés):**

Ezzel a globális módszerrel, a képpontok intenzitásának hisztogramját normális (Gauss-féle) eloszlások összegének tekintve pl. Bayes-féle döntési eljárás alapján lehet, küszöbértékek meghatározásával szegmentálni (Álló et al., 1993).

- **Szomszédság-elemzés:**

Ennél a lokális módszernél, a homogén régiók detektálása statisztikai módszerek alapján történik pl. split-merge, k-means, mean shift, watershed algoritmusokkal, Markov mezők segítségével (Kató, 2006). A lokálisan alkalmazott klaszterezés is ide sorolható.

- **Élkeresés, élnövesztés:**

Éleket kiemelő, zajt simító operátorok (HIPR2, 2003) használata után heurisztikus élkereső algoritmusokkal próbálják fogyasztani a téves vonalakat, folytatni a gyengébben látható, vagy fedettség miatt teljesen hiányzó vonalakat. Egyértelmű megoldása nincs.

A szegmentáló algoritmusok részletesen kidolgozott matematikai elmélete köteteket megtölt (Tzay and King-Sun, 1986, Jahne et al., 1999), de a feladatra nincs általános megoldás. A módszer alapproblémája az, hogy az emberi percepció szegmentálási folyamata szubjektív, azaz függ az objektumról alkotott előzetes elképzelésünktől is. Így egészíti ki az emberi agy egy oszlop mögött látott két fél-objektum képét egészszé. Ráadásul a szegmentáció eredménye alapvetően függ érdeklődésünk tárgyától is.

Nem beszélhetünk tehát abszolút értelemben vett jó vagy rossz szegmentáló algoritmusról. Mindig az adott probléma analízisével derül ki, hogy melyik eljárástól várhatjuk a leghatásosabb eredményt.

Élelmiszerek és nyersanyagaik, pl. termények látórendszeres vizsgálatára számtalan publikációt találhatunk az elmúlt 15 évre. Még az objektumtípusok, a szegmentálni kívánt tartományok felsorolására sem lehet vállalkozni, nem hogy a publikációkéra. Mindegyik alkalmazás speciális szegmentációs módszert használt, de egy különböző élelmiszerek kutatására fejlesztett mérőkönyvetnél általános, ugyanakkor jól hangolható módszerekre van szükség. Meg kell vizsgálni tehát mindhárom alpmódszer alkalmazhatóságát az élelmiszerek kutatására:

- A küszöb kiválasztásának döntéelméleti megközelítése Gauss eloszlásokat és két módot feltételez, ezért helyette speciális algoritmust kell fejleszteni a küszöb kiválasztására. Bár a háttér inhomogenitása „in vivo” körülmények között, pl. szántóföldi növények azonosításánál is komoly nehézségeket okoz (Philipp & Rath, 2002), a laboratóriumi munkában se lehet inhomogén színű objektumokat (pl. napraforgómag) egyszerű intenzitás alapján szegmentálni. Általánosabban alkalmazható küszöbölési technika kidolgozása szükséges.
- A szomszédság-elemző technikák közül a klaszterezés a legáltalánosabb és hangolhatóbb. Különböző színű tartományok felismerésére azonban csak akkor használható, ha minden tartomány területe azonos nagyságrendű. Szükséges az alap-eljárás tanulómintás (hangolható) változatának fejlesztése, a görbült felület inhomogén intenzitásának kezelésére pedig a szín- és szín-irányok távolságának megfelelő definiálása.
- Az élkereső és élnövesztő algoritmusok szegmentálási alkalmazásának lehetőségét meg kell vizsgálni.

A szegmentálás után kívánatos a hibásan szegmentált pixelek kiküszöbölése. A zaj fogalma szubjektív, általános algoritmus nincs. Esetünkre a zajszűrés történhet az egybefüggő tartományok pixel-száma alapján, az adott értéknél kisebb szigetek beolvasztásával.

Morfológiai operátort a körvonal konvex illetve konkáv részleteinek elhanyagolására szokás használni (Álló, 1993). A körvonal simítására, például levelek alakjának vizsgálatánál, a levélnyel elhagyására lehetne alkalmazni az eljárást.

Többváltozós statisztikai analízis alapértékeivel nem csak az egyes változók átlaga és szórása, de ugyanazon számításigény mellett, a kovariancia-mátrix meghatározza az egyes változók kölcsönös korrelációját is (Ezekiel & Fox, 1970). A címkézett, egybefüggő tartományok színének, felületének jellemzésére történhetne kovariancia-mátrix számításával.

Az alakjellemezés alapvető feladata, hogy adatredukcióval, minél kevesebb paraméterrel leírjuk egy adott objektumcsoport alakját. Célját tekintve három alapvető leírást különböztetnek meg:

- Ipari automatizálási feladat esetén, osztályozási feladatnál, nem feltétlenül szükséges, hogy a paramétereknek jelentése is legyen. Egy paprika-válogató automatánál pl. teljes alakleírás nem feladat, csak a gyors döntéshez szükséges pár paraméter mérése történik (Fűrös, 2007). A paraméterektől ebben az esetben csak annyit várunk el, hogy statisztikai vizsgálat során, az N paraméter N-dimenziós térben, az egyes osztályok pontfelhői minél jobban elkülönüljenek.
- Számítógépes szakértői rendszernél szükséges, hogy az alakot jellemző paraméterek megfeleljenek a hagyományos, szakértő által adott vizuális paramétereknek, mint pl. paprika

hossza, válszélesség, hasonlatosság bizonyos alaptípusokhoz, stb. (Farkasné et al., 1999). Hagyma jellemzésénél szintén szabvány írja elő az alaki paramétereket és az alaptípusokat is (Fehér et al., 2000). Ebben az esetben fokozottan igaz, hogy minden objektumtípusra csak egyedi adatredukciós módszert alkalmazhatunk.

- Növényfajták, mint élelmiszeripari nyersanyag identifikálása, a levél-, a mag színének, felületének jellemzése mellett, szintén alaki paraméterek alapján történik. Szántóföldi alkalmazásnál (Hemming et al., 2004) és morfológiai kutatásnál (Hermán et al., 2005) egyaránt fontos feladat az alak struktúrájának és részleteinek látórendszeres leírása. Az objektumcsoport összetettsége miatt, az előzőkétől jóval általánosabb algoritmusok felelhetnek csak meg.

Alakleírási módszereket kell fejleszteni mindhárom alapvető alkalmazási területre.

- Az alak általános leírására hagyományosan a terület képpontjainak 2 dimenziós statisztikájából számítják az átlagos méretet, a nagy- és kistengelyek irányát és nagyságát. A Fourier transzformációt előszeretettel alkalmazzák jelfeldolgozásban a jel meghatározott pontosságú reprezentálására (Székely 1994). A körvonal képpontjainak $x(t)$ és $y(t)$ függvénye periodikusnak tekinthető, így előállítható Fourier sorának együtthatóiból. Az algoritmus alkalmazásával meg lehetne határozni egy általános, konvex objektum tengelyeit, a nagytengely irányát, és ezen túl a szimmetriáit és a körvonal részleteit is.
- Szakértői rendszerben az alak speciális leírására alkalmaznak közelítő módszereket, amelyek a klaszterezéshez hasonlóan, az egyes osztályok átlagos alakjától való távolságot vizsgálják. Például hagyma alak szerinti fajta-besorolása történhet így (Martinovich & Felföldi, 1996). Hasznos lenne olyan közelítő módszert kifejleszteni, amelynél a speciális objektumtípus, pl. hagyma alakját jellemző paraméterek megfeleltethetők a hagyományos érzékszervi bírálat vizuális paramétereinek.
- Kertészeti termények általános célú morfológiai vizsgálatánál a részletek és az alapstruktúra felderítése lehet a cél. A részletek alkalmazási példája egy levél fogazottságának jellemzése. A feladatra Fourier transzformációs eljárás nem ad megfelelő leírást, ezért a töréspontok meghatározásán alapuló módszert kell fejleszteni. A körvonal töréspontjainak meghatározása, és közöttük mesterséges görbék illesztése segíthet a struktúra leírásában is. Természetes objektumok közös jellemvonása a görbült szimmetriatengely (lásd. banán, paprika, levelek). A struktúra leírásánál fontos ezen görbült topológia rektifikálása. Az erre született megoldások (Felföldi, 2002) csak egyszerűbb alakzatoknál eredményesek, ezért olyan algoritmust szükséges fejleszteni, amelyik akár az asszimmetrikusan fogazott levelek tengelyét is helyesen rektifikálja.

2.1.3 Színmérés

A színek rendezése a festők színkeverési tapasztalataitól, egyéb alkalmazásoktól származtatható. Fontosabb színkeverési eljárások (Lukács, 1982, Nemcsics, 1990):

- **Szubtraktív:** Átvilágításnál, visszaverődésnél a festék egyes frekvenciákat elnyel, tehát kivon.
Alapszínek pl. cián-bíbor-sárga (CMY).
Színrendszerekre példák: Tintometer-1887, Plochere-1946, Colorizer-1947
- **Additív:** Színes fénysugarak vetítésénél az intenzitások összeadódnak.
Alapszínek pl. vörös-zöld-kék (RGB).
Színrendszerek: Ridgway-1886, Ostwald-1915, Baumann-Parse-1942, Rabkin-1950
- **Vegyes:** A nyomdaiparban használatos raszter-rendszereknél, az egyes pontok mérete (additív) és az átfedések mértéke (szubtraktív) egyszerre határozza meg a színérzetet (1. b,c. ábra):
Színrendszerekre példák: Wilson-1942, Villalobos-1947, Hickethier-1963, Küppers-1976



1. ábra: RGB- és CMY színtér (a). Nyomdatechnikával előállított képen (b) a szem közelről (c)

Az ismertebb rendszerezési törekvések: **Newton** (*Optics*, 1704: prizma, színgör), **Goethe** (*Farbenlehre*, 1810: 3 pólusú RGB színgör), **Maxwell** (*Theory of Colour Vision*, 1860: 1-1-0 színháromszög), **Einstein** (1921). A fizika spektrális értelmezése („spektrális színmérés”, ahol az egyes frekvenciák intenzitását mérik adott felbontással) mellett végül két párhuzamos, a látás **fiziológiai** tulajdonságán alapuló színelmélet fejlődött ki:

- **Háromszín:** A **Young-Helmholtz** (1773-1824 / 1821-1894) elmélet feltételezése szerint a retinán lévő csapokban három különböző fotopigment van. Ezek abszorpciós görbéjén alapul a színinger. („trikromatikus”, színinger, színkeveréshez hasonlóan 3 pólusú)
- **Ellenszín:** **Edwald Hering** (1878) elmélete szerint a vörös-zöld, sárga-kék, fekete-fehér ingerek kioltják egymást a receptorokban. A kódolás miatt egyszerre nem észlelhetünk ellentétes színeket. („opponent coding”, színérzet, 4 pólusú)

Albert H. **Munsell** színminta-atlasza (1915) színérzéketlen alapul, színkeverési vagy méréstechnikai jellemzők helyett, a színeket három, rendezett, a **színérzetet** jellemző mérőszámmal írja le (2. ábra):

Hue: színezet (szög: 1..10*10)

Chroma: telítettség (sugárirány: 1..16)

Value: világosság (függőleges: 1..10)

Koordináta-rendszere Hering színrendszeréhez hasonlít, de 5 pólusú (RPBGY). Bár közvetlen méréstechnikai kapcsolata nincs, színminta-atlaszát az ipari gyakorlatban ma is aktívan használják, koordináta-típusait (Hue, Saturation, Lightness) a mai rendszerek (CieLch, HSI, HSV) is átvették.



2. ábra: Munsel színtér modellje (X-Rite, 2007)

A **színmérésen** alapuló színrendszerek sokszínűségére jellemzően néhány példa, ipari szabvány: OSA-1947, DIN-1953, NCS-1953, TGL-1963, HunterLAB-1981, Coloroid-82.

Érthető tehát, hogy felmerült az igény egy mérésen alapuló nemzetközi szabvány kialakítására.

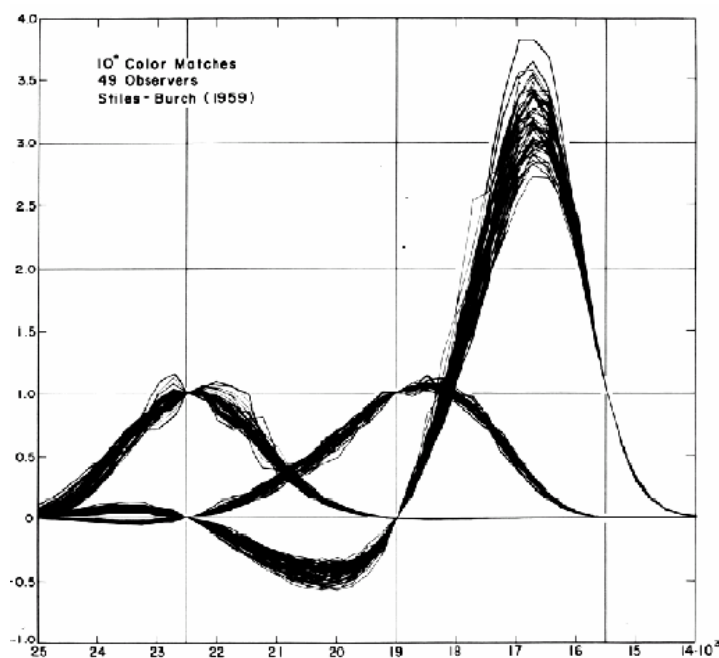
Napjainkban a Nemzetközi Világítástechnikai Bizottság CIE (Commission Internationale de l'Eclairage) nemzetközi szabványa a legelterjedtebb (CIE, 1987). Az 1931-ben elfogadott CIE (x,y) rendszer koordinátái állnak legközelebb a jellemzően videó képforrásunk additív RGB összetevőinek értelmezéséhez. A rendszer színingerek mérésén, a háromszín-elméleten alapul.

A Young-Helmholtz elmélet szerint az emberi szem úgy tudja az agynak szállítandó, feldolgozandó adatok számát redukálni, hogy szemben a 100-120 millió világosság-érzékeny pálcikával, a szemfenék közepén nagyobb számban elhelyezkedő kb. 6.5 millió csap háromféle fotopigmentjének érzékenységi görbéje különböző (maximumok: $\lambda_R=610\text{nm}$, $\lambda_G=535\text{nm}$, $\lambda_B=470\text{nm}$). A színinger e három szűrő szorzata egy adott spektrummal (300-830nm), így mindössze 3 paraméterrel leírható szemben a spektrális színmérés felbontástól függő adatsorától.

A színes TV technika pl. egy adott színinger rekonstruálásakor megfelelően választott R, G, B összetevők (primaries) additív keverésével igyekszik helyesen visszaadni a három integrált, a színingert. Természetesen ebből az is következik, hogy amennyiben egy élőlény (pl. a közhiedelem szerint színvak kutya) szemében a fotopigmentek érzékenysége más, úgy Ő az emberi szem számára beállított TV képet szürreálisnak találhatja. Szemünk érzékenysége az egyes frekvenciákra egyéneenként változik, ezért az, hogy mit látunk szintelenek, szintén egyéneenként különbözik.

A CIE 1931 szabványban:

- additív alapszíninger-összetevőknek (RGB primaries) a monokromatikus $\lambda_R=700,0$ nm, $\lambda_G=546,1$ nm és $\lambda_B=435,8$ nm hullámhosszú sugárzást választották,
- az összetevők fénysűrűségét ($L_R : L_G : L_B = 1,000 : 4,5907 : 0,0601$) úgy választották, hogy egységnyi mennyiségükkel additívan előállítható legyen az egyenlő energiájú spektrum (National Physical Laboratory: fehér etalon [reflexió])
- meghatározták és rögzítették az átlagos észlelő („standard observer”) $\bar{r}, \bar{g}, \bar{b}$ színinger-megfeleltető függvényeket (1931: 2° , 1964: 10° Colour Matching Functions) (3. ábra).



3. ábra: $\bar{r}, \bar{g}, \bar{b}$ színinger-megfeleltető függvények (Wilkie, 2002)

Egyes telített színeket az alapszínekből additívan nem, csak negatív együtthatókkal lehet kikeverni (az előállított szín helyett a referencia-színhez keverték). Méréstechnikai kényelmi szempontból határozták meg az RGB rendszer olyan lineáris kombinációját, amelyben

- minden szín pozitív együtthatókkal keverhető ki,
- egyenlő mennyiségük meghatározza a fehér színingert
- Y arányos a teljes fénysűrűséggel ($L_X : L_Y : L_Z$ arány)

Így kapjuk a képzetes XYZ **színínger-összetevőket** (4. ábra):

$$X = 2,36460 \cdot R - 0,51515 \cdot G + 0,00520 \cdot B \quad (1)$$

$$Y = -0,89653 \cdot R + 1,42640 \cdot G - 0,01441 \cdot B$$

$$Z = -0,46807 \cdot R + 0,08875 \cdot G + 1,00921 \cdot B$$

Amennyiben az RGB és XYZ rendszerek fehérpontja eltérő, úgy szorozni kell, az ún. Bradford mátrixszal is:

$$\underline{X} = \mathbf{B} \mathbf{C}_{rx} \underline{R} \quad (2)$$

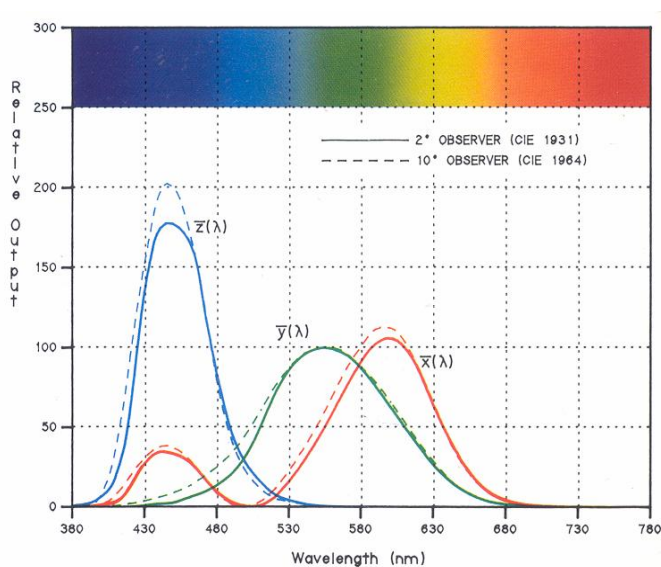


Figure 4: CIE 2° and 10° Standard Observers

4. ábra: 1931 és 1964 színínger-összetevők (X-Rite, 2007)

A homogén lineáris transzformáció nem ortogonális, de invertálható, egyenes-tartó. Úgy állítja a bázis irányát, hogy minden szín pozitív térszögbe kerüljön, és a súlypont megtartásával megváltoztatja a koordináták arányát, azaz XYZ nem párhuzamos RGB-vel (5.a. ábra).

A leképezés harmadik feltétele ellentmond a későbbi normálásnak, hiszen az azonos világosságú síkok nem lehetnek egyszerre párhuzamosak az XZ0 és az XYZ síkokkal. A lineáris transzformációnak semmi köze ahhoz, amikor egy videó eszköz által generált RGB jelet szeretnénk CIE XYZ koordinátákra konvertálni [lásd 5.2.1. fejezet].

Az XYZ képzetes összetevők által kifeszített színtérben már csak a pozitív $\pi/2$ térszögben figyelhetők meg színek. A kitöltött tartományt hívjuk **színtestnek**.

Feltételezve, hogy az XYZ színtérben a (100,0,0) - (0,100,0) - (0,0,100) pontok által kifeszített sík pontjainak világosság-ingere azonos, a színtest színeit a síkra vetítve elvonatkoztatunk a **világosságtól**. A színre jellemző **színezet** és **telítettség** információ a színvektor hosszától nem, csak

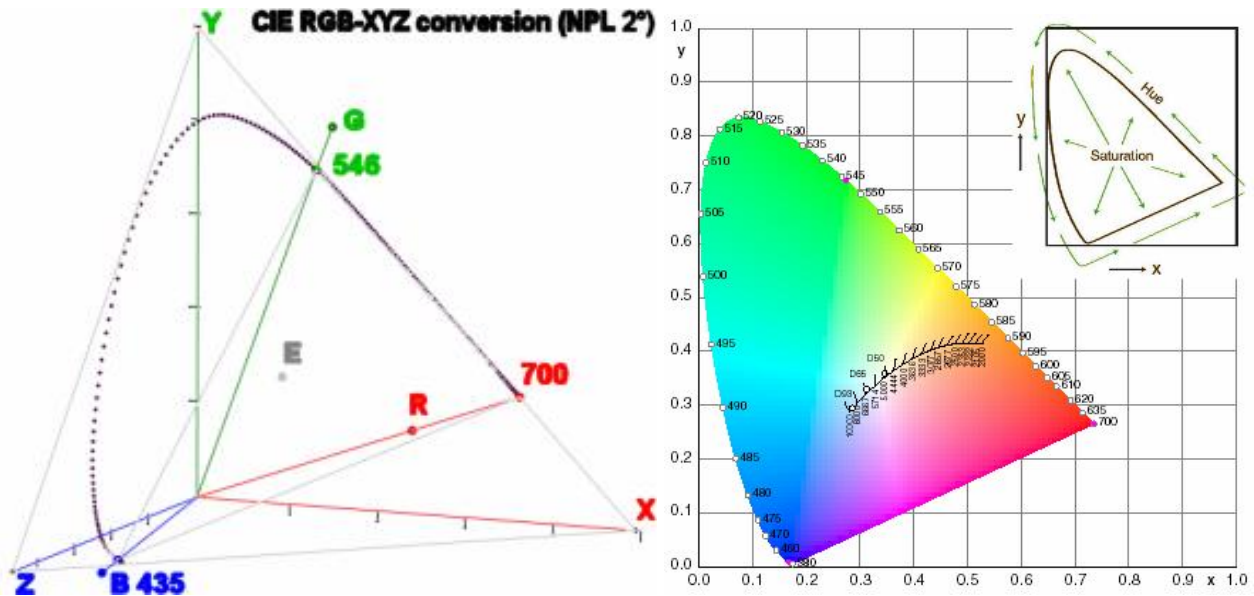
az összetevők arányától függ. Súlypont-meghatározáshoz hasonló számítással kapjuk a **színességi-koordinátákat**:

$$x = X / (X+Y+Z) \tag{3}$$

$$y = Y / (X+Y+Z)$$

$$z = Z / (X+Y+Z) \quad ; \quad z = 1 - x - y$$

A színtest, és az említett sík metszetének immár két-dimenziós, xy képe a **színinger-háromszög** (5.b. ábra).



5. ábra RGB->XYZ transzformáció és az xy sík CIE adatokból generált képe (a),
CIE1931 színinger-háromszög illusztrációja (b)

A körvonal $x(\lambda)$ és $y(\lambda)$ koordinátáit táblázatokban találhatjuk meg. Az $(\bar{R}, \bar{G}, \bar{B})$ alappontok a körvonalon, a spektrális színpályán találhatók meg. A bíbor színeket azok komplementerével jellemzik. A szürke színérzet ($x \sim y \sim z \sim 1/3$) helye egyéntől függ, átlagos helyét definiálja az E neutrális pont. A megvilágítás sugárzás-eloszlásától függő pontok: A: 2856K Planck-sugárzó, D65: 6504K nappali fény korrelált Planck, D50, stb.

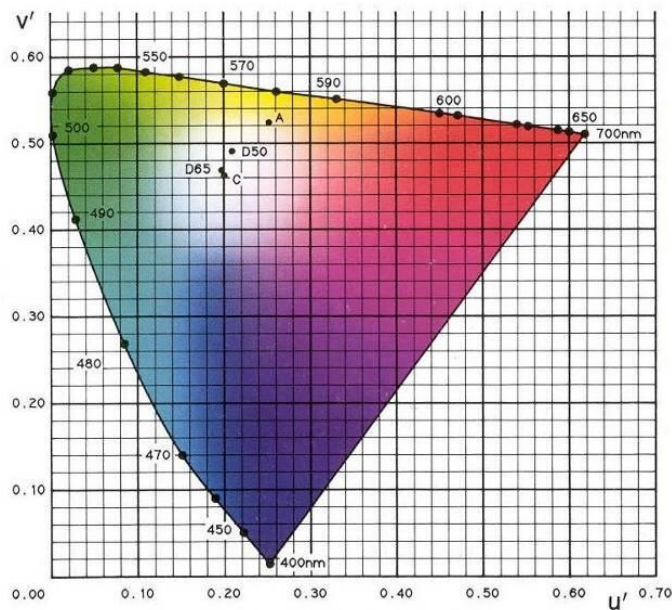
Az $E(x_n, y_n)$ neutrális pont és a mért szint összekötő félegyenes spektrális színpályával való metszéspontja megadja a domináns hullámhosszat, iránytangenséből becsülhető a színezet (hue), a határtól való távolságból pedig a telítettség (saturation). Mivel a **Munsell, xy, Lab** rendszerek között nem lineáris a kapcsolat, a rendszerek **Hue** és **Saturation** értelmezése nyilván nem ugyanaz.

Az emberi szem a mérések szerint kb. 500 világosság-értéket (Intensity \Rightarrow Lightness), 160 árnyalatot (Hue \Rightarrow h) és mindössze 20 telítettség-értéket (Saturation \Rightarrow Chroma) tud megkülönböztetni. Az egyenlő szintávolság igényének kíván megfelelni a CIE 1964 UCS (Uniform Chromaticity Scale),

vagy más néven Yu'v' ajánlása (6. ábra). Mivel világosság-érzékelésünk un. láthatósági függvénye a zöld színinger-megfeleltető függvényhez hasonló harang-függvény (csak annál szélesebb), az intenzitást itt már csak a zöld összetevőből számítják.

$$u' = \frac{4X}{X + 15Y + 3Z} = \frac{4x}{-2x + 12y + 3} \quad (4)$$

$$v' = \frac{9Y}{X + 15Y + 3Z} = \frac{9y}{-2x + 12y + 3}$$



6. ábra: CIE 1964 UCS [u', v'] (X-Rite, 2007)

Az (x, y) és (u', v') rendszerek nem felelnek meg annak az igénynek, hogy az egyforma színérzékeléskülönbségeknek ugyanakkora távolságok feleljenek meg. A CIE erre két alternatívát ajánlott:

- A CIE 1964 $L^*u^*v^*$ az $Lu'v'$ továbbfejlesztése.
- A CIE1976 $L^*a^*b^*$ (7. ábra), A Munselhez hasonló, de Ewald Hering: „Opponent colour” elméletén alapuló tér, azaz egy színérzet nem lehet egyszerre zöld és piros ($a = -60..+60$), kék és sárga ($b = -60..+60$) egyszerre.

Számításuk függ a választott neutrális ponttól (referencia fehértől):

CIE 1976 Lab:

$$X_1 = \frac{X}{X_n} \quad Y_1 = \frac{Y}{Y_n} \quad Z_1 = \frac{Z}{Z_n}$$

$$X_2 = (X_1 > 0,008856) ? (X_1^{1/3}) : (7,787 \cdot X_1 - 16/116)$$

Y_2, Z_2 ugyanígy

$$L^* = 116 \cdot Y_2 - 16 \quad a^* = 500 \cdot [X_2 - Y_2]$$

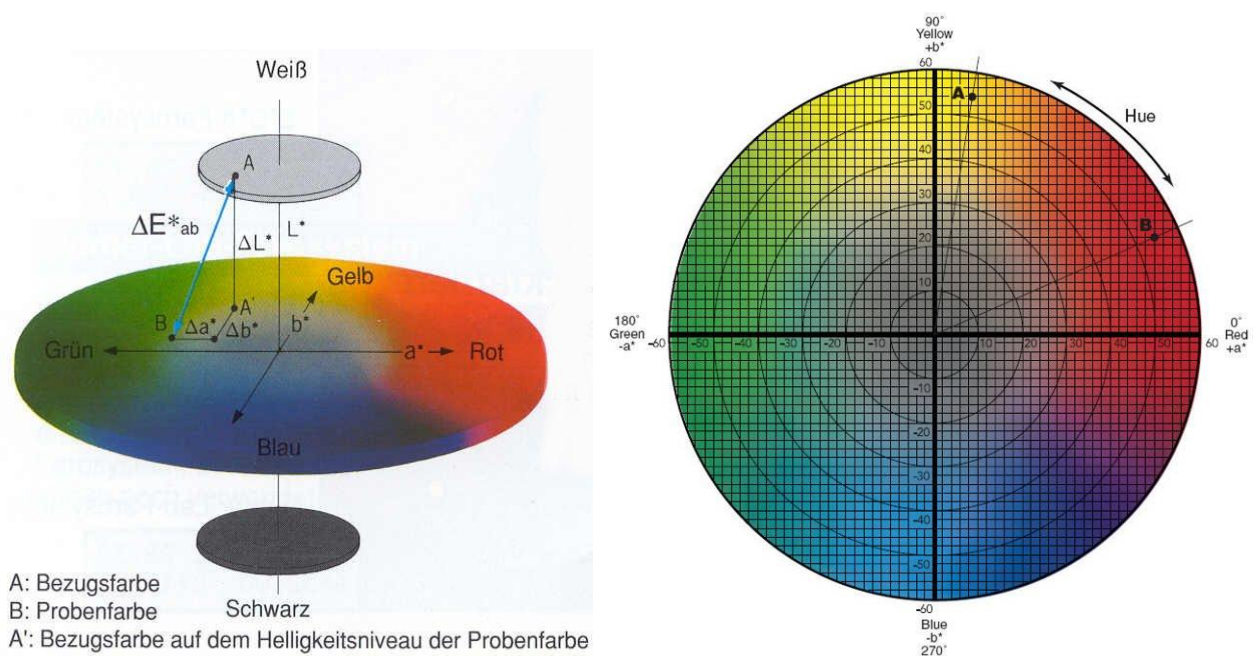
$$b^* = 200 \cdot [Y_2 - Z_2]$$

CIE 1976 Luv:

$$L^* = 116 \cdot \left(\frac{Y}{Y_n}\right)^{1/3} - 16 \quad u^* = 13L^* \cdot (u' - u_n)$$

$$v^* = 13L^* \cdot (v' - v_n)$$

(5)



7. ábra: CIE Lab és LCh színrendszerek (Minolta ismertető, X-Rite, 2007)

A CIE-Lab rendszer másik értelmezése visszakanyarodik a Munsell színrendszer koordináta-típusaihoz:

CIE 1976 LCh:

$$L^* = 116 \cdot \left(\frac{Y}{Y_n}\right)^{1/3} - 16 \quad (6)$$

$$C^* = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}}$$

$$h^0 = \arctan\left(\frac{b^*}{a^*}\right)$$

Tapasztalataim szerint a színezet (Hue angle) és telítettség (Saturation) paraméterek könnyen derítik fel montázs képek és generált színrendszer ábrák rejtett tulajdonságait. A színrendszer ígéretesnek látszik egyes termények fertőzésének, rothadásának kimutatására.

Az ipari gyakorlatban előfordulnak még elterjedten alkalmazott, és ami munkánkban fontos, a videó eszköz által mért RGB koordinátákon alapuló rendszerek, pl:

- HSI (Hue, Saturation, Intensity) képfeldolgozás, 120°
- HSV (Hue, Saturation, Value) képfeldolgozás, 120°
- YUV (Monochrome, ΔR, ΔB) European Broadcasting Union (PAL/SECAM)
- YIQ (Monochrome, ΔR, ΔB) National Television System Committee (NTSC)

Méréstechnikai kérdések:

Az objektumok színének látórendszeres méréséhez a mért RGB jel és a CIE XYZ koordináták között megfelelő transzformációt meghatározni.

A CIE 1931-ben rögzített $\bar{R}, \bar{G}, \bar{B}$ és XYZ koordinátái között lineáris a kapcsolat, ugyanakkor a képforrásból nyert RGB jel függ a mérés körülményeitől. Az RGB leképező eszközök bázisát („device primaries”), un. „Gamut”-ját (additív keveréssel létrehozható terület) az EBU definiálja (Hoffmann, 2005). A leképező eszközök mért RGB koordinátáit gyakran összekeverik a CIE RGB összetevőkkel. Az internetes irodalomban ez alapján elterjedt lineáris transzformációs képleteket, pl. Color Conversion Algorithms (Vishnevsky, 2005) szeretném elsősorban cáfolni:

$$X = 0,4306 \cdot R + 0,3415 \cdot G + 0,1784 \cdot B \quad (7)$$

$$Y = 0,2220 \cdot R + 0,7067 \cdot G + 0,0713 \cdot B$$

$$Z = 0,0202 \cdot R + 0,1295 \cdot G + 0,9394 \cdot B$$

Csak az aktuális mérésre lehet a mért RGB jel és a CIE XYZ koordináták között megfelelő transzformációt meghatározni, etalon felületek mérésének elemzésével. Színtáblázat mérésével hasonlították össze különböző CIE Lab rendszerbe transzformáló módszerek (lineáris, négyzetes, „direkt”, „Gamma” és neuron-hálós) hatékonyságát (León et al., 2006). Az összehasonlítás eredményénél fontosabbnak tartom a méréstechnikai alapok tisztázását. Nyomtatási technikával előállított színes mintázatokot használtak etalonként, amelyek átlagszínét mérhetjük ugyan színmérővel, de egyéb tulajdonságait (pl. szórást) nem. Az objektumok színének látórendszeres méréséhez a következő alapvető méréstechnikai kérdéseket tartom szükségesnek megvizsgálni:

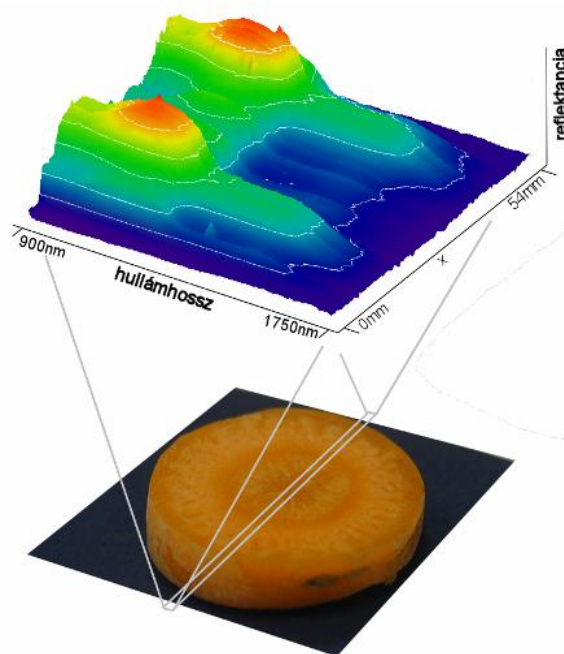
- Megfelelő-e a kamera által mért jel stabilitása méréssorozat alatt és méréssorozatok között? Ha nem, milyen algoritmikus és kalibrációs módszerekkel kondicionálható?
- Milyen kalibrációs lépésekkel konvertálható a mért RGB jel CIE XYZ térbe? Milyen etalonok mérésével (bázispontok) lehet transzformációt találni az általuk kifeszített XYZ térbe?
- A mért jelre milyen hatással van az objektum felületének görbülete? Milyen méréselrendezéssel lehet vizsgálni a jel függését a beesési és visszaverődési szögtől?

Színtől független tulajdonság (mintázat) felületi eloszlásának jellemzésénél a stabilitás sok esetben nem annyira szükséges feltétel, mint színmérésnél. A vizsgált tulajdonságot (pl. alma ráncosodását, kenyérbél porozitását) minél jobban kiemelő operátor kiválasztása lehet kutatás tárgya. Élelmiszerek kutatására fejlesztett általános mérőszoftveren lehetővé kell tenni, hogy a felhasználó különböző operátorok hatását kipróbálhassa és az eredmények statisztikai értékelésével választhasson optimális operátort.

2.2 Hiperspektrális képfeldolgozás

Főként laboratóriumi, minőség-ellenőrzési feladatokban alkalmazott optikai technika, a spektroszkópia. A spektrális jellemzők (reflexió, abszorpció, stb.) mérésével szemnek láthatatlan, például beltartalmi jellemzőket detektál. Adott élelmiszer vagy nyersanyag tulajdonságának detektálásához, a spektrum mérésével és az adatok analízisével határozhatók meg az összetevő jellemző abszorpciós csúcsai, a tulajdonság jellemző hullámhosszai. A kutatók által így meghatározott hullámhosszokra érzékeny ún. multi-spektrális szenzorok, a látórendszerhez hasonlóan mérhetik az egyes hullámhosszak intenzitásának hely szerinti eloszlását. A gyors és érintés-mentes multi-spektrális látórendszer mérésének eredménye szintén alkalmas akár minőség-ellenőrzési, akár ipari automatizálási feladatra.

Az utóbbi években, a repülőgépes távérzékelésben elterjedt push-broom hiperspektrális mérésnél spektrográf képezi le a vizsgált vonal képét a szenzor mátrixra (8. ábra), így a szenzor méri a vonal pontjainak spektrumát adott felbontással. A vonalra merőlegesen, egyenletesen haladva, adott frekvenciával mérve megkapjuk a felület összes képpontjainak spektrumát. A push-broom módszer (Lawrence et al., 2003), a letapogató fénysugár eltérítése (whisk-broom, flying point scanner), vagy hangolható szűrő (variable focal-plane array) használatához hasonlóan használható az élelmiszeripari alkalmazásokat előkészítő, a jellemző multi-spektrális hullámhosszakot meghatározó kutatásokban is. Ugyanakkor a push-broom mérési módszer megfelel a gyártósoron, szállítószalagon történő valós idejű válogatási- és egyéb automatizálási feladatokra is.



8. Ábra: Push-broom mérés-elrendezés

A hiperspektrális mérések megbízhatósága általában messze elmarad a spektroszkópiában megszokott és elvárt igényektől, aminek elsődleges okai, hogy a felület nincs izolálva, a megvilágítás kevésbé definit, a felület egyenetlensége miatt az intenzitás és a szín-szórás zaja is növekszik, a mérés spektrális érzékenysége nem homogén, a szenzor-mátrix egyes pixeljei pedig zajosak lehetnek.

A módszer élelmiszer-analitikai használatához első feladatként olyan mérési környezetet, azaz algoritmust és mérési eljárást kívántam fejleszteni az eszköz kalibrálására és a mérési ciklusok vezérlésére, amellyel biztosítható a mérés jelszintje és stabilitása, a zaj szűrése, valamint a mérőeszközök összehasonlíthatósága.

Egy felület szenzor által meghatározott felbontású képpontjainak spektruma óriási tárhelyet, képenként akár több gigabyte-ot ($1024 \times 1024 \times 1280 \times 2$) igényel. A távérzékelési feladatokban ezt a hatalmas adatmennyiséget analizálják a mérés után, a földön matematikai-, statisztikai módszerekkel kifejezve a vizsgált tulajdonságokat (Warner and Shank, 1997; Ryan and Arnold 1997; Tsai and Philpot, 1998; Meer and Jong, 2001; Meer, 2004, 2006).

A chemometriában gyakran használt főkomponens-analízis (PCA) kifejezi az adatok által kifeszített vektortér bázisát, a koordináták (irányok) szórás szerint csökkenő sorrendjében. Ismert tulajdonság, pl. nedvességtartalom vizsgálata esetén célszerűbb más, tanulómintás adatredukációs módszer alkalmazása, például:

- Fisher diszkriminancia-analízis (FDA)
- legkisebb négyzetek (PLS: partial least squares)
- lineáris diszkriminancia-analízis (LDA), multi-lineáris regresszió (MLR)
- mesterséges neuronháló (ANN: artificial neural networks)
- polár minősítő rendszer (PQS: polar qualification system) (Kaffka and Seregély, 2002)

Szemben a távérzékeléssel, az élelmiszerek laboratóriumi mérése megismételhető. Esetenként akár több száz egyed mérése esetén, kívánatos lenne az adatokat már mérés közben, valós időben előfeldolgozni, ezzel az adatmennyiséget csökkenteni. Adott tulajdonság, például nedvességtartalom vizsgálata esetén, megfelelő operátorral, a spektrális adatot (vektor) redukálhatjuk a tulajdonság intenzitását leíró skalárra. Az így nyert, a tulajdonság eloszlását kifejező pszeudo-képek mérete lényegesen kisebb lenne.

A mérési környezet (szoftver) másik fejlesztendő feladata volt a spektrális adatok valós idejű redukciója, akár több jellemző intenzitásának számítása a felület pixeljeire. A célnak megfelelő, vektorról skalárra képező, ún. lényegkiemelő operátorok meghatározása előzetes mérések statisztikai elemzése alapján történhet.

2.2.1 Sárgarépaszövetek nedvességtartalmának mérése

A rendszer alkalmazásaként a sárgarépa nedvességtartamának spektrális jellemzők alapján történő meghatározását vizsgáltuk. A hiper-spektrális mérési módszer alkalmas lenne a tárolás során bekövetkező száradás roncsolás- és érintés-mentes felderítésére, vagy a hibás példányok kiválasztásával minőség-ellenőrzésre is.

A sárgarépa nedvességtartalmának mérése alapvető módszer a tárolt sárgarépa minőségének meghatározására (Herppich et al., 1999; Némethy and Fehér, 2002; Ruiz-Lopez et al., 2004). A NIR spektroszkópia egy jól ismert optikai módszer az élelmiszerek összetevőinek becslésére (Hruschka, 1987; Kaffka and Gyarmati, 1994). A sárgarépa NIR spektrális jellemzőinek mérésével meghatározható annak nedvességtartalma (Belie et al., 2003; Abu-Khalaf et al., 2004; Zude et al., 2007). A NIR spektrális jellemzők hely szerinti eloszlásának mérése ugyanakkor lehetővé tenné a különböző répa-szövetek nedvességtartalmának becslését. A különböző szövetek viselkedésének ismerete segítene a száradás folyamatának modellezésében, illetve ipari minőségellenőrzési feladatokban is..

A hiperspektrális képfeldolgozási módszerekkel a távérzékelésben vizsgálják a felszín nedvességtartalmát (Champagne et al., 2003; Vranic et al., 2005; Jung et al., 2006; Xing et al., 2007). Ez a roncsolásmentes, sőt érintésmentes mérési módszer ipari automatizálási feladatokban is alkalmas élelmiszerek különböző felületi jellemzőinek hely szerinti eloszlásának mérésére (Lefcote et al., 2006; Nicolai et al., 2006; Cho et al., 2007). Hiperspektrális képfeldolgozó rendszerrel tehát becsülhető a sárgarépa nedvességtartalma, de előzetes mérések alapján meghatározandó a spektrum adatból (vektor) a nedvességtartalom intenzitását (skalár) kiemelő adatredukciós operátor.

A nedvesség-tartalmat optimálisan leíró, spektrumról intenzitásra, azaz vektorról skalárra képező operátor (célfüggvény) meghatározásához, répaszeletek spektrumát kell megvizsgálnunk különböző fajtákon, szövet-típusokon és tárolási körülményeken, regisztrálva a nedvességtartalom változását és a szeletek különböző szövettípusainak spektrális jellemzőit. Megfelelő mérési eljárást kell kifejleszteni a vágással roncsolt sejtek nem kívánt spektrális változásának kiküszöbölésére. Képfeldolgozó és statisztikai algoritmust kell kidolgozni az adatok feldolgozására, a különböző szövettípusok kiválasztásától az optimális adatredukciós operátor meghatározásáig.

3 Cékitűzések

3.1.1 Trikrómikus módszer célkitűzései

Céлом általános és jól hangolható szegmentálási módszerek kifejlesztése automatikusan szétválasztható és speciális esetekre:

- Két színosztályt tartalmazó kép szegmentálására a küszöbölés változatát fejleszttem ki. Olyan esetekre, amikor a kép az intenzitás hisztogramja szerint nem szegmentálható, intenzitás helyett a színvektor speciális vektor-skalár konverzióját kívánom használni, statisztikai vizsgálat alapján számítva az adott egyedre optimálisan szétválasztó irányt. A küszöb kiválasztására valós-idejű döntési módszert kívánok fejleszteni és implementálni.
- Több színosztályt tartalmazó kép speciális szegmentálására, pl. objektum résztartományainak kiválasztására a klaszterezés olyan tanulómintás algoritmusát fejleszttem ki, amely abban az esetben is működik, amikor az osztályok elemszáma nem összemérhető. Az osztályközpontoktól való távolság definícióját kiterjesztem színezeti szögek távolságára, ezzel kezelve a 3D objektumok görbült felületek inhomogén megvilágítás okozta intenzitásbeli inhomogenitását.
- A robusztus élkereső és –növesztő algoritmusok várhatóan kevésbé eredményesek természetes objektumok, termények esetén, mivel azok kontrasztja sok esetben kicsi. Az élnövesztés heurisztikus módszere a mesterséges intelligencia kutatás tárgya. Szegmentálási feladatra általánosan nem, várhatóan csak speciális esetre alkalmazható.

Céлом módszert fejleszteni a szegmentálás eredményének korrekciójára, zajszűrésre:

- Pixelek valós idejű feldolgozására festő eljárást fejleszttem ki, amellyel egy egybefüggő tartomány képpontjai szekvenciális listába sorolhatók.
- A hibásan szegmentált képpontokat a tartományok minimális pixelszámának megadásával kívánom eliminálni.
- A körvonal konvex- és konkáv részleteit morfológiai operátorok (nyitás, zárás) használatával kívánom simítani.
- A szegmentált tartományok színének, egyéb felületi jellemzőinek leírását több-dimenziós statisztika készítésével, a kovariancia-mátrixszal jellemzem.

Céлом megvizsgálni a szín látórendszeres mérésének feltételeit:

- Megvizsgálom a színérés stabilitásának és az eredmény konverziójának hardver, kalibrációs és algoritmikus feltételeit.
- Céлом olyan mérési módszert kidolgozni, amellyel mérhető az objektum kiterjedésének, a görbült felületnek, valamint az egyenetlen megvilágítás hatása a mért RGB jelre.

Céлом a 2D alak jellemzésére módszereket fejleszteni, az alak általános tulajdonságainak (szimmetriák) leírására, speciális objektumcsoport alakjának leírására és termények morfológiai jellemzésére a struktúra és részletek leírására:

- Alak általános leírására a Fourier transzformációt használom. Eljárást dolgozok ki a körvonal képpontjainak szekvenciális listázására. A tartomány súlypontjának számítása után polárkoordinátákkal reprezentálom a konvex burok képpontjait. Az adatvektort lineáris interpolációval transzformálom 2-hatvány szög szerint ekvidisztans adatra. A Diszkrét Fourier Transzformáció eredményét átalakítom (amplitúdó, eltolás) reprezentációra. Az eredménnyel jellemzem az alakzat szimmetriáját és részleteit.
- Alak speciális leírására, az objektumcsoportra meghatározott N paraméteres célfüggvény illesztését használom. LSE módszerrel (saját minimum-kereső algoritmussal) határozom meg az adott egyed legjobban közelítő függvény N paraméterét. Célalkalmazásomban az eredmény hatásosságát illusztrálja a számított N paraméterrel generált mesterséges objektum 3D képe.
- Alak struktúrájának és részleteinek leírására a töréspontokat határozom meg a görbület, illetve lineáris regresszió számításával. A választott töréspontok között célfüggvényt vagy mesterséges görbéket illeszttek. A természetes alakzatoknál, pl. terményeknél, leveleknél gyakori görbületre, a görbült topológia rektifikálására általánosan használható módszert fejlesztet ki.

3.1.2 Hiperspektrális módszer célkitűzései

Elsősorban mérési környezetet, algoritmust kell kifejleszteni a hiperspektrális látórendszer vezérlésére, az eszköz kalibrálására és adatgyűjtésre, a szükséges jelszint, stabilitás és reprodukálhatóság biztosítására, magában foglalva a következőket:

- Az InGaAs infravörös szenzor "Salt-and-Pepper" zaját kell kiköszöbölni, a működésképtelen pixelek állapotának szomszédos pixelek alapján történő becslésével és a hiba szomszédos pixelekre gyakorolt hatásainak javításával.
- A rendszer spektrális- és hely-szerinti inhomogén érzékenységet kell kezelni sötét felület és világos etalon felület, azaz a pixelek munkatartományának mérésével
- Az infravörös szenzor hőmérsékletét stabilizálni kell a hőt elvezető Peltier-cella vezérlő értékének automatikus beállításával.
- Végül, a mért adatkockát elő-feldolgozással, a vizsgált jellemzők eloszlásának valós idejű meghatározásával kell redukálni.

A rendszer alkalmazásaként megfelelő mérési eljárást és adatredukációs operátort kell meghatározni a sárgarépa szövetek nedvesség-tartalmának becslésére száradás közben. Az eredmény egyben bizonyítaná a mérési eljárás és az algoritmus megbízhatóságát, az operátort pedig multi-spektrális mérésben használhatnánk ipari automatizálási feladatokban.

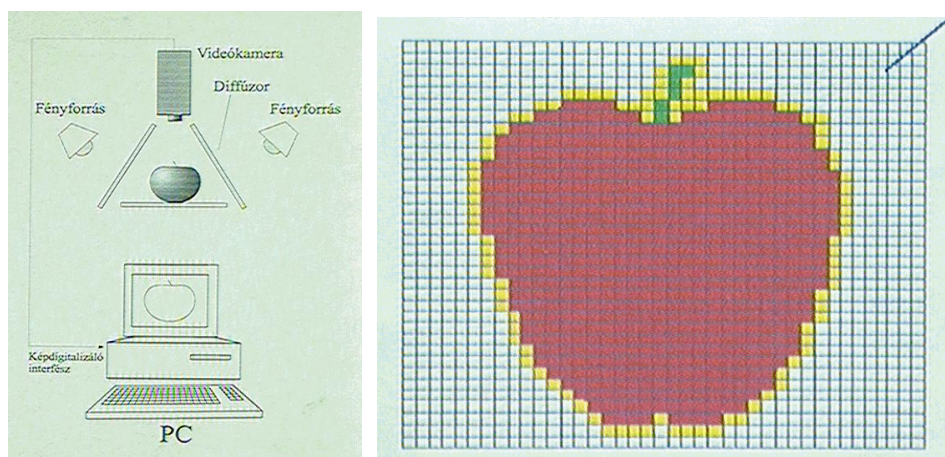
4 Anyag és módszer

4.1 Trikromatikus képfeldolgozás

4.1.1 Méréselrendezés, hardver

Az élelmiszerek, termények szín-, alak- és felületi jellemzőinek mérésére alkalmas **méréselrendezés** tanszéki képfeldolgozó munkacsoportunk munkája. A feladat univerzális, hangolható megoldást kívánt. A kamera távolsága könnyen állítható akár nagyobb méretű objektumok-, akár kicsiny felületek (makro) vizsgálatára. Az objektumot a diffúzor felületek izolálják a környezettől, amelynek megvilágítási viszonyait nem tudnánk stabilizálni.

A méréselrendezés fejlesztése, kamera, optika és digitalizáló választása, a megvilágítás stabilizálása (Felföldi et al., 1994, Győri et al., 1995), diffúz megvilágítás kiépítése (Szepes, 1999), az 50 Hz-es zaj és a CCD „árnyék-jelenség” detektálása (Gillay, 2007), cél-algoritmusok fejlesztése és implementálása (Baranyai and Firtha, 1997) kollektív munka eredménye (9. ábra (Vízhányó, 2000)). A megfelelő méréselrendezés különösen a szín-információk laboratóriumi mérésekor kap fontos szerepet.



9. ábra: Méréselrendezés sematikus képe (a), digitalizált kép (b)

A **megvilágítást** általában halogén izzósor biztosítja, melyek feszültségét, más hardvereszközökkel együtt, nagy teljesítményű stabilizált tápegységgel biztosítjuk. Az izzók fénye közvetlenül a diffúzor felületeket világítja meg és csak a visszavert fény éri a vizsgált objektumot. Ezzel egyenletesebb lesz a megvilágítottság és jelentősen csökkenthető a tükröződés. Konkrét feladatra használunk más megvilágítást is, például ellenfényt mikroszkópos vizsgálatnál vagy alkalmaztam teljesen izolált

környezetben („blackbox”) párhuzamos fény-nyalábot is, ugyanis a surlófény jól kiemeli felület egyenetlenségeit.

A kamera kiválasztásának szempontjai a következők voltak:

- A stabilitás érdekében az automatikát ki lehessen kapcsolni, a fehérégyensúlyt, valamint az CCD szenzor egyéb paramétereit manuálisan lehessen beállítani
- A hardver eszközök 50Hz-es zajának kiküszöbölésére a „Shutter”-t ki lehessen kapcsolni, így az 1/50 másodperc intervallumnál hosszabbat integrálni (a fényforrás és a kamera meghajtható puffertelt egyenárammal, de a PC és az AD kártya nem)
- A számítógépről vezérlés képességét és a rendkívüli 1000 fps mintavételi frekvenciát kutatási célú alkalmazásunkban nem használjuk ki.

Az optika kiválasztásánál a minőségen túl a makrózás képességét és a nagy fényérzékenységet követeltük meg.

AD kártya digitalizálja a kamera analóg jelét (Composite / S-VHS / D-Com9). Ennek alapvető paramétere: capture/grabber, hardveres tömörítés, overlay/preview, illeszkedés: ISA, VESA local, PCI. A kommersz kártyák többnyire a házimozi célokra kifejlesztett Bt878 chipset-tel dolgoznak. Hibája, hogy sajnos erős kontraszt esetén árnyékot eredményez. Ezen elrendezés hibája a DAD zaj, azaz a CCD kamera diszkrét pontokra bontja a képet, abból horizontálisan analóg jelet készít, amit az AD kártya ismét diszkrét pontokra bont és digitalizál.

A bemutatott ábrák többségénél Hitachi HV-C20 professzionális mérőkamerát használtam (Felbontás: 768*494px, Shutter: 1/100s to 1/10'000s, AutoGain, AutoIris, WhiteBallance: 3200K/5600K, Out: NTSC [BNC], Y-C [S-VHS], Y-C/ RGB). Az S-VHS porton érkező Y-C jelet Aver PC-Imager kártya digitalizálta.

Az alkalmazott Canon TV zoom V6x16 optika nagy fényérzékenységgel és makro-lehetőséggel rendelkezik. Mikroszkopikus felvételeket Nikon YS2-T mikroszkóp armatúrájával és optikájával készítettünk.

A diffúz megvilágítást 12V-os halogén izzóssal, a párhuzamos fénynyalábot Carena 5005 AF diavetítővel (halogén izzóval) értük el. A hardver eszközök feszültségének stabilizálását 5kVA teljesítményű stabilizált tápegységgel oldottuk meg.

Az inhomogén megvilágítás hatását mérő "blackbox" méréselrendezés forgószámolyának 30W-os léptetőmotorját saját fejlesztésű elektronika vezérli LPT porton keresztül.

A fejlesztett algoritmusokat 21” látható képméretű, nagyfelbontású monitorral ellátott hagyományos személyi számítógépen futtattuk (Pentium IV CPU 1.7GHZ, 1GB RAM, 120GB HDD).

4.1.2 Szoftver-környezet, alaprutinok

Személyi számítógépen a képfeldolgozás lépéseit, drága hardver eszközök hiányában, szoftveresen végezhetjük. Ez bizonyosan lassabb futási időt eredményez, de új alkalmazási terület esetén lehetővé teszi a felhasználandó algoritmusok tervezését és tesztelését, gyors, így költség-kímélőbb módosítását. A szoftveres algoritmusok sebessége, bár automatizálásban (pl. osztályozás) nem mindig elegendő, laboratóriumi vizsgálatokra (pl. minőségellenőrzés) elégséges. Az algoritmusok tervezésénél a hatásosságon túl mindvégig szem előtt tartottam a gyors futási időt és a könnyű hardveres adaptálhatóságot. A PC-n futó kezdeti interpreteres nyelvek (basic, Quick Basic, Pascal) után, végre a lefordítható nyelvek (pl. a Turbo család TP, TC, Tasm nyelvei) megjelenése biztosíthatta a kívánt sebességet.

A sebesség igénye és az eszközök gépközeli programozása miatt döntöttem a kellően alacsony szintű, ugyanakkor platform-függetlennek hirdetett **C nyelv** mellett (Kernighan and Ritchie, 1988). Ennek ára az volt, hogy a legalapvetőbb feladatokat is programozni kellett (menü-kezelés, adatbevitel, file-kezelés, stb.), a platform-függetlenség pedig eszközök kezelésénél természetesen nem jelent hardver-függetlenséget, hiszen időközben pl. a monochrom, CGA, EGA majd VGA monitor-kártyákból SVGA szabvány lett, szinte minden eszköz kicserélődött, annak kezelése változott. Az interrupt és port alapú eszköz-kezelést csak igen szövevényes assembly és C kóddal lehetett megvalósítani (Úry, 1988, Pethő, 1988). A kipróbált C nyelvjárások közül (MSC, Watcom, Borland, stb.) végül a Borland C++ volt a legdokumentáltabb, legígéretesebb (Benkő, 1992).

A kezdeti nehézségek másik oka az XT-től örökölt **16 bites címzés** volt. 15 évig szenvedtek az IBM-Microsoft platformon dolgozó programozók a kompatibilitási okok miatt megtartott szabvány miatt, amíg meg nem jelent a Windows 95®, az első 32 bites Microsoft® operációs rendszer. Addig az MS operációs rendszerek monopol helyzete állta útját más, korszerűbb, 32 bites rendszerek elterjedésének. 16 bites, azaz szegmens-offset típusú címzésnél egy memóriablokk (szegmens) mérete maximum 64 kB lehet, a maximálisan elérhető tartomány pedig 1 MB, amiből a betöltött programok felemésztk az alsó 640 kB nagy részét. 1 MB-ig DOS alatt a Himem.sys, tovább az EMM386.exe driver-programok tették lehetővé a címzést. A 64 kB egy 320x200 felbontású, max. 256 színű kép méretének felel meg, ami messze nem elég a képfeldolgozás igényeinek (pl. a 24 bites színmélység miatt). Ezért utóbbi esetben mind a memóriát, mind a képernyő memóriáját csak un. lapozással, sőt a memória-hiány miatt legtöbb esetben az EMM386 interrupt-jainak hívásával vagy

saját „swapfile” technikával lehetett kezelni. Lapozásnál külön figyelni kellett arra, hogy a 24 bites (3 byte) képnél, egy a határon lévő pixel adatai két különböző szegmensre eshetnek.

A képernyő-kezelést végül a VESA programozási technika felprogramozásával, a SMALL és LARGE memória-modellek tár-problémáját pedig, az újabb processzorok 32 bites PROTECTED módját kiszolgáló DPMS32 kódra való átírással lehetett megoldani (Benkő, 1996).

Az új 32 bites **Win9x/Nt** operációs rendszerek megjelenésével egyszerre lehetett elfeledkezni a memória-gondokról, hiszen a 32 bites címzés, a rendszer saját memória-kezelése (swap-fájlok) ezt könnyűvé tette, valamint az eszközök port-szintű programozásáról. A hardver-gyártóktól követelménnyé vált a különböző operációs rendszereket és nyelveket támogató illesztő-programok (driver-ek) mellékelése. Azok, illetve az operációs rendszerek, nyelvek hibáinak javítása (patch) a továbbiakban az Ő gondjuk. Ezzel párhuzamosan megfogalmazták a Windows platformra tervezett nyelvek irányadó technikáit annak előnyeivel (modularitás, standard interface-ek, néhol csak erőltetett objektum orientáltság) és nehézségeivel (nem szekvenciális, üzenet alapú, párhuzamos gondolkodás, operációs rendszer hibáinak öröklése) együtt.

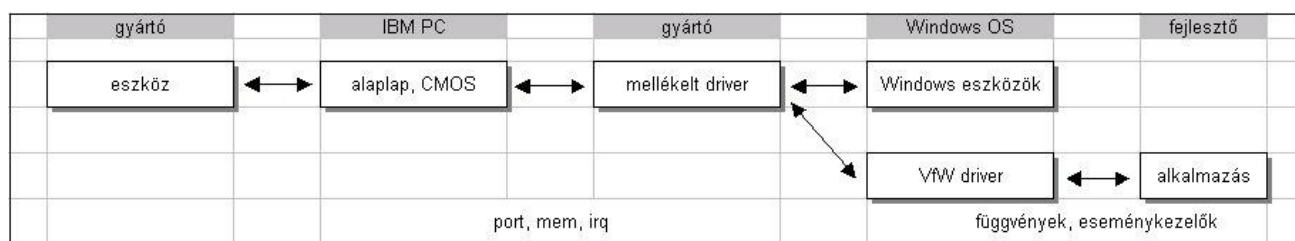
El lehetett dobni az eddigi DOS alapú fejlesztéseket, cserébe kapva a Visual nyelvek magas-szintű kényelmét, a lehetőséget, hogy a fejlesztő az algoritmusokra és ne a részletekre koncentrálhasson. Pontosabban a programozónak még inkább el kell döntenie, hogy a magasszintű nyelveken kódol kutatási, laboratóriumi célokra alkalmazható programokat, vagy alacsonyszintű nyelveken készített hardveresen adaptálható, valós-idejű, ipari alkalmazásokban is használható algoritmusokat. A programozásban is felerősödött a moduláris, hierarchikus felépítés, többé már nem ezermesterek, hanem team-ek, speciális területekhez értő guru-k munkája. Nem ipari alkalmazásról, hanem kutatásról lévén szó, egy magasszintű, ugyanakkor gyors, jól dokumentált fejlesztői környezetet választottam, a **Borland C-Builder-t** (Benkő, 1999).

Egy képfeldolgozó szoftver első feladata a **kép megnyitása**, azaz leképezése a memóriában (DIB). Ennek legegyszerűbb formája egy, pl. a digitalizáló kártya szoftvere által előzetesen mentett képfájl megnyitása. Itt különböző mentési formátumokra kell felkészülni, mint például:

- Windows vagy OS/2 Bitmap (BMP): 1,2,4,8,24 és 32 bites, általában tömörítetlen
- Zsoft Paintbrush (PCX): 1,2,4,8 és 24 bites, tömörítetlen formátum
- CompuServ Graphics Interchange (GIF): 8 bites, veszteségmentes tömörítés, főként animációra
- Joint Photographic Experts G. (JPEG): 24 bites, veszteséges tömörítés
- Tagged Image File Format (TIF): 24 bites (Lab encoded), veszteségmentes tömörítés
- Truevision Targa (TGA): 24 bites, veszteségmentes tömörítés

A képformátumok listáját természetesen sokáig folytathatnánk, de az említettek fordulnak elő leggyakrabban a képfeldolgozás gyakorlatában. Az egyes formátumokat, alapvető célfeladatokon kívül, elsősorban a kódolási algoritmusuk különbözteti meg. A legtöbb esetben védett és így messze nem publikus technológia teszi nehezzé egy ilyen egyszerűnek látszó lépés programozását. DOS alatt az összegyűjtött információk alapján magam kódoltam le az egyes formátumok megnyitását, mentését, Win32 platformon DLL-be gyűjtött algoritmusok segítségével oldom meg.

A digitalizáló kártya közvetlen megnyitása lehetővé teszi a képforrás mozgóképének megjelenítését, feldolgozását. A művelet DOS alapú (ill. általában az alacsony szintű) programozása igen nehézkes volt, portok, memóriacímek, interruptok kezelését igényli. Az ilyen illesztés teljesen hardver-függő, csak konkrét eszközre alkalmazható, a következő AD kártya típus esetén eldobható. A Windows megjelenésével elterjedt gyakorlat az illesztőprogram (driver) készítését a gyártóra bízni, tervezésükhöz csak az interface-t adja. Windows alatt a videó típusú MCI eszközök ilyen szabványos felülete a „Video for Windows” (VfW) (10. ábra).



10. ábra: Fejlesztői rétegek

A VfW felület programozási lehetőségeiről a Borland nyelvekhez mellékelt MMEDIA.HLP ad segítséget. Függvényhívással lehet adott videó eszközt megnyitni, bezárni, a képet ablakhoz rendelni, az eszköz paramétereit lekérdezni, beállítani, az eszköz illesztőprogramjának dialógusablakait (forrás, formátum, megjelenés) megnyitni, a „preview” vagy „overlay” megjelenítést indítani, leállítani, az utolsó képet BMP formátumban menteni (grab).

Jóval nehezebb a helyzet, ha preview mozgóképet adott méretben kívánunk megjeleníteni, vagy az úgynevezett frame-eken kell valamilyen műveletet végrehajtani (pl. módosítás, képfeldolgozás, tömörített mentés, „capture”). Az eszköz-illesztő egy, az egyes frame-ek leképezése után meghívott, ún. „Callback” függvény használatát kínálja. Szerencsés esetben (hardveres tömörítés nélküli kártya) a függvény átadott paramétere egy, a BGR mátrixot tartalmazó memória-területre mutat, ellenkező esetben a feldolgozandó és kijelzendő képet csak „Vágólap”-on keresztül érhetjük el.

Professzionális alkalmazás készítésére a VfW protokoll teljesítménye kevés. Ilyen alkalmazásoknál az eszköz közvetlen kezelése szükséges. Ez rámutat arra, hogy egy képfeldolgozó program írásakor, az algoritmus hatékonyságán kívül, elsőrendű szempont annak sebessége. A második legnagyobb ellenfél a futási idő. Ezt követi csak a hardver-eszközök, operációs rendszerek, fejlesztő környezetek változása által okozott gond.

A vezérlő szoftver, mint szükséges mérés-technikai alap megoldása után végre következhet a képfeldolgozás. A memóriába való leképezést követő első feladat esetünkben a vizsgált **objektum szegmentálása**. Ez a lépés már meglehetősen cél-specifikus, így gyakorlatunkban használható alapvető módszereit munkám külön fejezetében fogom taglalni.

4.1.3 Fejlesztett célalgoritmusok

Képfeldolgozó munkám kezdetekor (1988: kép beolvasása DOS alatt C, Assembly nyelven) nem léteztek rutinkönyvtárak, ahol modulokból lehetett volna felépíteni egy alkalmazást. Célszoftver nélkül nem lehetett még képet beolvasni sem, nem hogy feldolgozni. A képek elérésére, az objektum kiválasztására és a célfeladat által kívánt jellemzők kinyerésére fejlesztettem szoftvert DOS platformra, majd később Win16, VESA, DPMI32 és végül Win32 alá.

Alkalmazásaim mára tetszőleges VfW jelforrás képét eléri, azon valós-idejű operátorokat hajtanak végre (nagyítás, tükrözés, színtér-konverziók, mozgásérzékelés, stb.). A kiválasztott képeken, akár kötegelten, algoritmusaim kiválasztják az objektumokat, operátorok leírják azok színét és alakját. Az egyes részeredmények, pl. színtesztika, körvonalak koordinátái, stb. automatikusan menthetők, azokat munkacsoportunk statisztikailag elemezheti. Az eszköz elérését ActiveX komponensem végzi, a képfeldolgozási rutinokat pedig könyvtárból (DLL) érheti el a képfeldolgozó programfejlesztő.

A továbbiakban ismertetett eljárások minden algoritmusát C nyelven programoztam. A nyelv hatékonyságát számos alkalmazási terület bizonyítja. Erről tanúskodnak az eredmények fejezetben példaként felsorolt publikációk, hallgatói munkák, TDK dolgozatok, diplomamunkák és PhD értekezések.

Általános célú képfeldolgozó szoftverem az alapvető képfeldolgozási lépéseket elvégzi (képfelvétel, előfeldolgozás, szegmentálás, színtesztika, körvonal leírása, egyéb operátorok tesztelése, részeredmények grafikus kijelzése, mentése).

Az alapvető képfeldolgozási algoritmusokat kezdetben DOS-LIB, majd Windows DLL és OCX komponensekbe gyűjtöttem, hogy megkönnyítsem azok könnyű felhasználását adott célfeladatban. Mára már egyre több, az olyan matematikai csomag (pl. Mathcad, Matlab, ENVI) vagy fejlesztői nyelvekben (C++, C#, Java) használható képfeldolgozó rutinkönyvtár, amelyekből a felhasználó akár matematikai vagy képfeldolgozási háttér nélkül, modulárisan építhet fel egy alkalmazást. A már felépített képfeldolgozó algoritmusok újra-kitalálása és programozása felesleges. Ennek jegyében születhetett komponenseim felhasználásával számos olyan alkalmazás, ahol az adott objektumtípus (termény, élelmiszeripari nyersanyag) szakértőjének, már nem kellett feltétlenül matematikusnak és programozónak is lennie.

A dolgozatomban ismertetett, általános képfeldolgozó algoritmusokat implementáló szoftveren és komponensein kívül, a képfeldolgozáshoz szükséges egyéb adatfeldolgozó algoritmusokat, valamint speciális képfeldolgozó célfeladatokat végző algoritmusokat is fejlesztettem. A legfontosabbak:

Stat	Képfeldolgozó szoftver élelmiszerek, alapanyagok, termények vizuális paramétereinek akár kötegelt mérésére. A DOS 16 bites verzió 1991-től 1995-ig volt a tanszéki kutatások képfeldolgozó alapszoftvere.
Stat2	DPMI32 verzió. A teljesen átírt alacsonyszintű rutinok (ASM) 32 bites címzést és a képernyő VESA kezelését teszik lehetővé.
ImgProc	Win32 verzió. 1998 óta vesz részt a kutatásban és az oktatásban.

Komponensek:

FFVesa.lib	DOS, DPMI32, VESA alaprutinok gyűjteménye: eszközkezelés (EMS, virtuális memória, text/VESA grafika, egér, lpt, hangkártya, mérőkártya, video-in), filekezelés (Ini, képfájlok), 3D-motor, matematika, statisztika.
VWins.dll	VfW videó eszközt kezelő statikus komponensek. Eszköz képét előfeldolgozza, megjeleníti, menti BMP/PCX/JPG/GIF/... formátumban
VfwGabX.ocx	VfW videó eszközt kezelő ActiveX komponens. Eszköz képét előfeldolgozza, megjeleníti, menti BMP/PCX/JPG/GIF/... formátumban
FFImgPro.dll	Alapvető képfeldolgozási algoritmusok gyűjteménye: saját képtípusba olvasás, operátorok, szelekciós módszerek, statisztika, alakleírás
DIBconvert.dll	Különböző szinterek konverzióit megvalósító függvényeim könyvtára

Adatfeldolgozásra:

Cluster	Tanulómintás klaszter-analízist implementál képre vagy adatfájlra
FnGraph	Valós időben paraméterezzhető egyváltozós függvény ábrázolására
Debi	Skalár adatsor közelítése adott, folytonosnak feltételezett N-változós függvénnyel a négyzetes hiba (MSE) minimumának keresésével
MBPN	Mesterséges neuronháló (Multilayer Backpropagation Neural Network) alkalmazása N dimenziós adatsorra (Simpson 1990)

Célfeladatra:

Reflection	Mért RGB jel beesési- és visszaverődési szögtől való függésének mérésére
Polar	Képen a középpont és a befoglaló téglalap kijelölésével transzformál polár-koordinátákra (száradó alma felületének vizsgálatára)
Circle	Kenyér porozitásának leírására (3 módszerem implementálása)

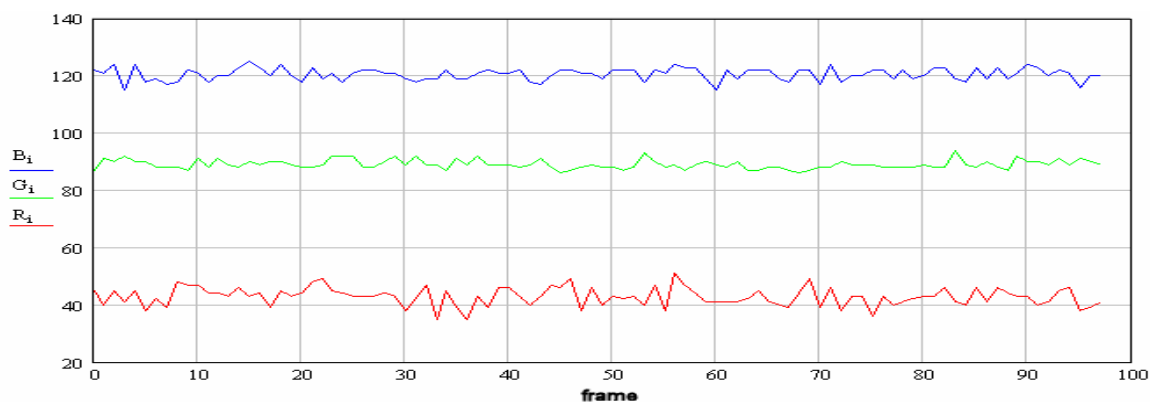
A dolgozatban bemutatott kiértékelések és ábrák másik része Mathcad algoritmusaimmal készült. Az eredmények statisztikai értékelésére MS Excelt, SPSS és Unscrambler szoftvereket használtam.

4.1.4 Kalibrálás

A színmérés alapvető feltételei a jel-zaj viszony emelése, a stabilitás biztosítása és szabványos szintérbe való konvertálhatóság.

A különböző típusú kamerák időbeli stabilitását ellenőriztem. A kamerák képe időben erősen változik, amit szemünk tehetetlensége és a szomszéd pixelek átlagának nagyobb stabilitása miatt nem észlelünk. Megfigyelve adott pixel jelének idő szerinti változását, például egy CMOS kamera adott pixelen mért RGB koordinátáinak idő szerinti szórása 10 fölötti (kvantum= 1/256), de még professzionális CCD kameránk képe is meglepően nagy szórással lebeg idő szerint (11. ábra):

$$\text{stdev}(B)= 2.108 \qquad \text{stdev}(G)=1.587 \qquad \text{stdev}(R)= 3.204 \qquad (8)$$



11. ábra: Hitachi HV-C20 3CCD kamera adott pixelének változása képenként (20fps)

Ezért a zaj csökkentésére algoritmusomban lehetővé tettem, az utolsó n kép lineáris kombinációjának mentését egyszerű átlagolással, és a képeket exponenciálisan súlyozó algoritmussal is. Mentési módszeremmel jelentősen lehet csökkenteni a képek zaját és növelni a színmérések stabilitását.

A méréssorozat reprodukálhatóságát, időbeli stabilitását a következőképp biztosítottam:

a.) Mérőkamera alapparamétereinek ellenőrzése:

A kamera automatikus beállításainak kikapcsolásával lehet biztosítani a mérések összehasonlíthatóságát. Ezen ellenőrzendő paraméterek:

- White Balance := MEM manuálisan lehessen adott felületre állítani a fehéregyensúlyt
- ShadingCorr. := Lumin optika vertikális árnyékhatását ne kompenzálja

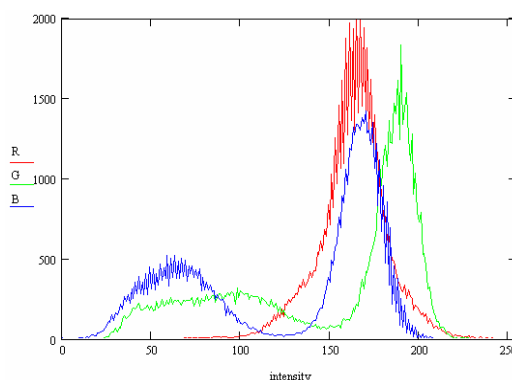
- AutoGainControl := Off ne legyen automatikus erősítés
- Gain := Normal (0 dB) ne legyen nem-lineáris erősítés
- Shutter := Off ne legyen automatikus zársebesség
- Gamma := Off ne legyen nem-lineáris korrekció
- Contrast := Off ne legyen automatikus világosság-szint növelés (dark portion)
- Knee := Off ne erősítse automatikusan a dinamikus tartományt (white portion)
- IrisGate := Off egész ablakon átlagolt jelszint alapján állít AGC és shutter értéket

AutoBlack állítása: Zárt objektív-sapkával beállítandó, hogy fény hiányában a jelszint 0 legyen.

b.) Méréssorozat paramétereinek deklarációja:

A kameratávolság és látótér beállítása a vizsgált objektumcsoport várhatóan legkisebb és legnagyobb eleme alapján végzendő. Úgy kell megválasztani a munkatartományt, hogy férjen bele a legnagyobb, de még a legkisebbnek is elegendően nagy legyen a felbontása. Amennyiben túl széles a tartomány, azaz a legkisebb elem felbontása nem elegendő, úgy csak több kamera-beállítási sémával lehet megoldani a mérést.

Ehhez hasonlóan kell kiválasztani az adott megvilágításnak és objektumcsoportnak megfelelő blende-állást is, ezzel meghatározva a kamera munkatartományát (12. ábra). Az objektumcsoport várhatóan legsötétebb és legvilágosabb elemét vizsgálva, úgy kell kiválasztani a blende-állást, hogy a legvilágosabb egyik csatornája se legyen túlvezérelve, de a csatornák ne legyenek alulvezérelve sem. Amennyiben a legsötétebb objektum felületének nem elég nagy a jelszintje, úgy csak speciális logaritmikus kamerával, vagy több blende-beállítási sémával lehet megoldani a mérést.



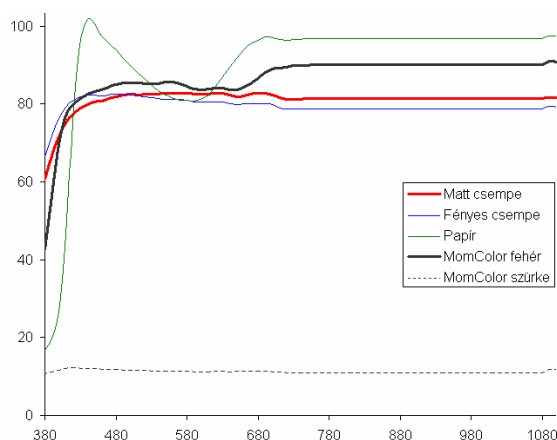
12. ábra: Mintakép RGB csatornáinak hisztogramja helyesen beállított méréstartományt mutat

c.) A mérésenként végrehajtott kalibrálási eljárás:

- Ellenőrizni kell a kamera beállításait, a megvilágítás és a képfelvétel szoftveresen állítható paramétereit. (a mérés összes paramétereit a méréssorozat elején deklaráljuk)
- A kamera távolságának beállítása, fókuszálás. (más párhuzamos mérések miatt többi között ezt is elállíthaták)
- A hardver adott idejű melegedését megvárni. (fényforrással ellentétben a kameránál és AD kártyánál csak a képfelvétel alatt képződik jelentős hőmennyiség)
- Nem túl- vagy alulvezérelt, spektrálisan homogén szürke etalon felületre zoom-olva beállítani a fehéregyensúlyt (lásd indoklás a.),
- Beállítani az optikán, a méréssorozat elején deklarált látóteret. (a művelethez centiméterszalag vagy nyomtatott sablon használható)
- Szoftver segítségével ellenőrizni, hogy a kamera, a méréssorozat elején rögzített blendeállásnál, az előző méréssel azonos fénymennyiséget (R+G+B átlag) kapjon az etalon szürke felületről.
- Ismert XYZ koordinátájú piros, zöld, kék és fehér etalonkorongok mérésével ellenőrizni a fehéregyensúlyt, a túlvezérlést, ezzel biztosítani a mérések összehasonlíthatóságát (lásd b.).

Indoklás:

a.) A fehéregyensúly beállításánál használt lehetséges etalonok spektrumát UltraScan spektrofotométerrel (HunterLab UltraScan 8009) ellenőriztem. A mérések alapján adott típusú matt fehér csempe homogén fehérnek mutatkozott. Képfeldolgozási feladatokban, az esetlegesen inhomogén megvilágítás, a tükröződés hatásának kizárása miatt célszerű matt etalont választani. A csempe 13. ábrán pirossal jelzett reflexiós spektruma egyenletesebb, mint a MOMCOLOR fehér etalon, az ábrán feketével jelölt spektruma. Mivel a választott csempe mérete elegendően nagy, távolabbi kameraállás mellett is kitölti a látóteret, alkalmas az etalon szerepre.



13. ábra: Etalonok reflexiós spektruma

A hitelesítéshez használt, Országos Mérésügyi Hivatal által gyártott 16 darab MOMCOLOR **etalon korong** (14. ábra) spektrumát szintén lemértem. A spektrumokból az UltraScan készülék által számított CIE1931 XYZ koordinátákat összevetve a korongra írt értékekkel jó egyezés mutatkozott, tehát mind az UltraScan mérést és transzformációt, mind a korongok X1, X2, Y, Z adatait megbízhatónak tekintettem.



14. ábra: Etalon korongok

Ezen korongok RGB koordinátáinak mérésével és XYZ koordinátaikkal történő összehasonlítással ellenőriztem, hogy mik az RGB és XYZ koordináták közötti monoton, kívánatosan lineáris kapcsolat feltételei. Méréseim szerint a helyes RGB-XYZ kapcsolat feltétele, a kamera és digitalizáló kártya alapparamétereinek helyes beállításán túl, a fehéregyensúly és a munkatartomány megfelelő beállítása.

- Az eredmény bizonyíthatóan nem függ attól, hogy milyen intenzitású (fehér vagy szürke), egyébként spektrálisan homogén felületre állítottam be a fehéregyensúlyt.
- Erősen függ viszont attól, ha túl-, vagy alulvezérelt képre állítom be a fehéregyensúlyt. Ebben az esetben a mért RGB jel nem megbízható, még a kapcsolat monotonitása is sérül (15. ábra).

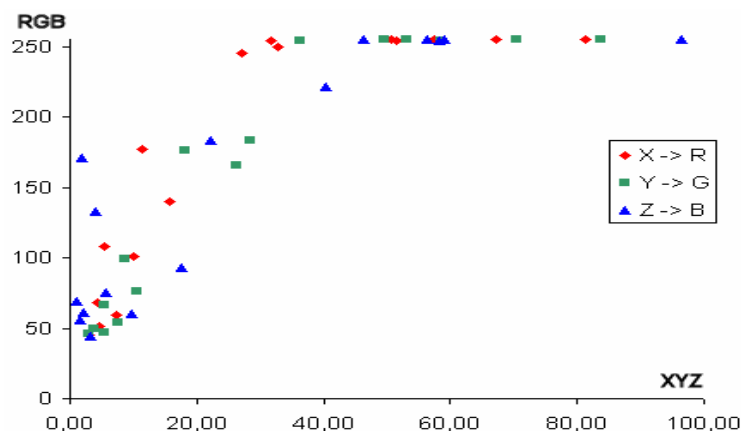
Ezért a fehéregyensúly rögzítésekor a blendét úgy kell állítani, hogy a kamera közepes intenzitású jelet mérjen (szürkét).



15. ábra: Túlvezérelt fehéregyensúly hatása

- Természetesen az RGB-XYZ kapcsolat akkor is sérül, ha rossz méréstartományban dolgozunk. Túlvezérelt kép esetén például, mivel az R(X), G(Y), B(Z) pontok 3 képzeletbeli egyenes mentén

statisztikusan helyezkednek el, ezért a felülvégzés során a 3 függvény monotonitása is sérül (16. ábra).

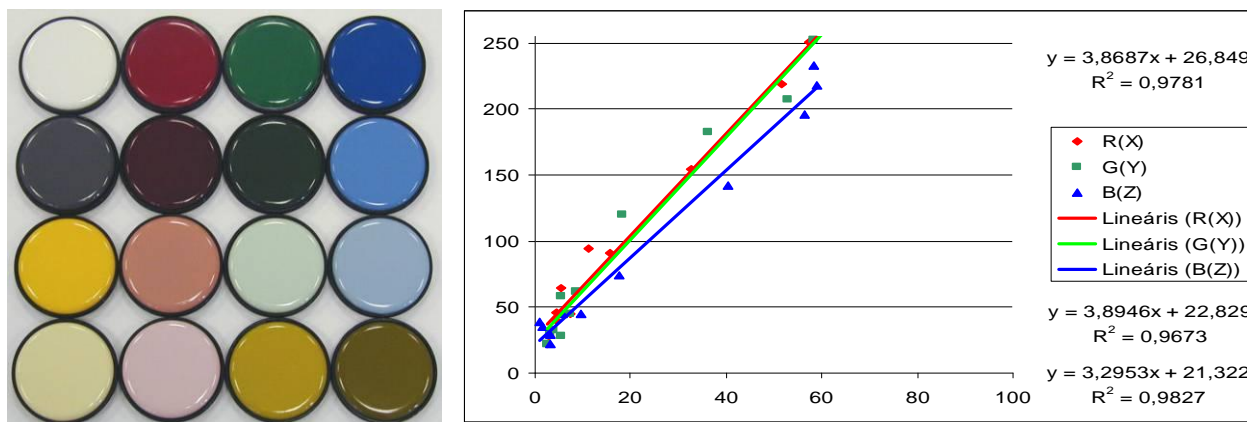


16. ábra: Túlvezérelt képen sérül a monotonitás feltétele is

A méréssorozat paramétereinek deklarálásakor tehát, ezen korongok látorendszeres szín-mérésével ellenőrzöm, hogy az adott méréselrendezésnél lehet-e monoton, lineárisnak tekinthető kapcsolatot számítani a mért RGB átlagok és a CIE1931 XYZ koordináták között.

b.) A mérésutasítás utolsó pontjában említett négy kiválasztott szín mérésével pedig ellenőrzöm, hogy a kép nincs túlvezérelve és a színek koordinátái az előző méréshez képest nem változtak. A három alapszín kifeszíti a teret, azaz mérésükkel, az ellenőrzésen túl, lineáris konverzióval összehasonlíthatóvá lehet tenni enyhén eltérő méréseket is. Amennyiben linearitás nem feltételezhető, csak több etalon mérésével, azaz interpolációval lehet a konverziót megvalósítani.

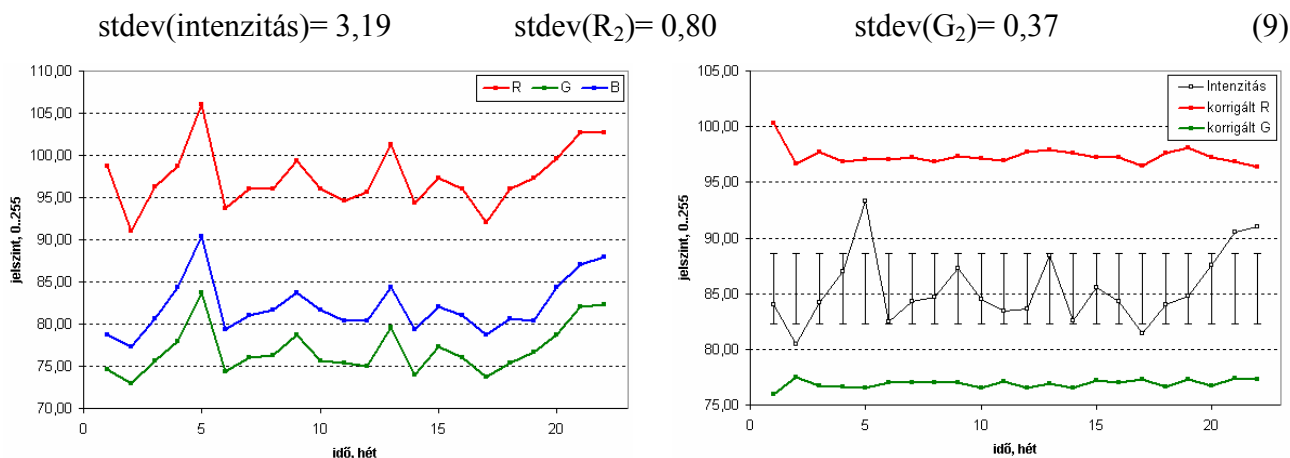
Az Excel kiértékelés bizonyítja, hogy az etalonok, későbbi 5.2.1 fejezetben részletezett hiányossága ellenére, a fehéregyensúly helyes beállításával el lehet érni szoros lineáris kapcsolatot ($R^2=0.97$) a két színrendszer megfelelő koordinátái között (17. ábra).



17. ábra: Kapcsolat a 16 etalon korong CIE XYZ (0..100) és mért RGB értékei (0..255) között

Dohánylevelek fermentáció közbeni színváltozásának mérése (Firtha et al., 2005) során vált különösen fontossá a mérés hosszú távú stabilitásának biztosítása. Az egyes leveleket nem lehetett újramérni, mivel azokat nem kívántuk izolálni a nagy tömegben, ipari környezetben fermentálódó levelektől. A mérési pontok azonosításának hiányában levél-halmokat kellett hetente statisztikai mennyiségben vizsgálni. Ráadásul a méréssorozat a járulékos kémiai és mikrobiológiai vizsgálatok miatt is megismételhetetlen volt.

A fent ismertetett mérésutasítással 22 héten keresztül sikerült a dohánylevelek mérésének stabilitását minden egyes mérésre biztosítani. A három etalon hetente mért színének idő szerinti szórása az átlagosan 85,73 intenzitáshoz képest megfelelő, a koordináták szórása (RGB: 3,60 – 2,89 – 3,25) megfelelő, nagyságrendje megegyezik a kamera, korábban leírt idő szerinti szórásával (18.a. ábra). A három koordináta látványosan együtt változik, ezért megvizsgáltam a koordináták intenzitástól független szórását. A koordináták értékét az átlag-/aktuális-intenzitás értékkel szorozva, a korrigált R és G koordináták szórása meglepően alacsony (18.b. ábra):



18. ábra: 3 etalon átlagszínének (a) és a normált R_2 , G_2 koordináták és intenzitás (c) változása

- Az intenzitás szórása tehát a mérésutasítás betartásával megfelelt a jelforrás mérési pontosságának. Ekkora szórás az etalonok mérése alapján lineáris transzformációval, kis hibával korrigálható.
 - A színek stabilitása tökéletesen kielégíti a 0-255 dinamikus tartományú mérés követelményeit.
- Javaslom a bemutatott mérésutasítás végrehajtását a kamera ellenőrzésére, a mérések tervezésére valamint végrehajtására.

A méréseim azt bizonyítják, hogy alkalmas mérésutasítással stabilizálható a mérés, növelhető a jel-zaj viszony és az eredmény konvertálható szabványos színrendszerbe.

Így a színmérő műszerek mellett, az inhomogenitást leíró számítógépes képfeldolgozó rendszer is alkalmas lehet a felület színének mérésére.

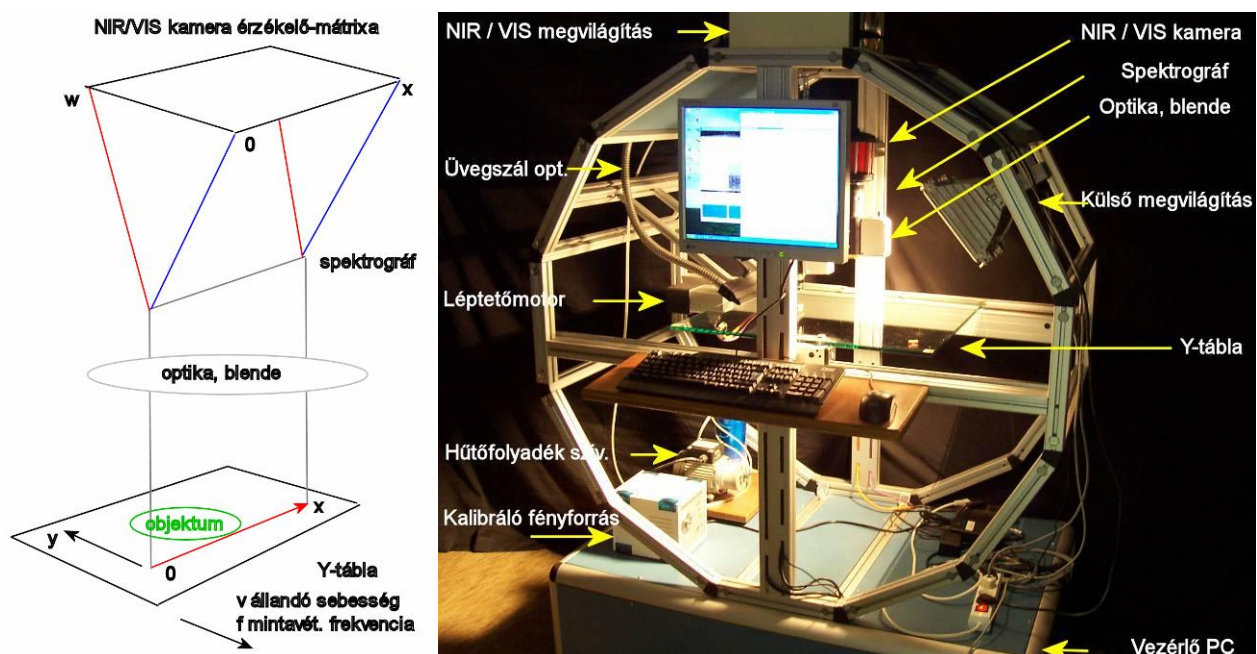
4.2 Hiperspektrális képfeldolgozás

A hagyományos képfeldolgozó rendszerek az érzékelésből származtatott RGB koordinátákkal jellemzik egy felület pixeleit. A mérés technika örök kihívása a kvantitatív jellemzésen túl azonban, olyan jellemzők mérése, amiket közvetlenül nem érzékelünk. Megfelelő méréselrendezéssel, a látható jellemzők kiemelésén túl, a hagyományos szenzorokkal is mérhetünk szem számára láthatatlant. A hiperspektrális képfeldolgozás eszközeivel ötvözhető a képfeldolgozás eszközei a spektroszkópia lehetőségeivel. Egy hiperspektrális képfeldolgozó rendszer ugyanis látható vagy NIR tartományú spektrummal jellemzi egy felület pixeleit.

4.2.1 Rendszer-fejlesztés

A korábban főként távérzékelésben használt „push-broom” (toló-pásztázó) technika egyszerre a felület egy sorát vizsgálja. A megfelelően megvilágított vonal (x) visszavert fényét optikán és blendén keresztül spektrográf képezi le egy téglalpra, felbontva a fényt hullámhossz komponenseire (19. ábra).

Kamera digitalizálja a téglalapot adott spektrális (w) és vonal-menti (x) felbontással, adott dinamikus érzékenységgel. A vonalra merőleges (y), állandó sebességgel mozgatva az objektumot, megfelelő frekvenciával felvéve a sorok Intenzitás(w,x) mátrixait, kapjuk a felület Intenzitás(w,x,y) tenzorát ("hiperkocka").



19. ábra: Hiper-spektrális mérőberendezés

Az ismertetett mérésekhez az ábrán bemutatott hiperspektrális berendezést (Zeutech) használtuk. A készülék külön kamerát, spektrográfot, optikát és megvilágító egységet használ a vizsgált hullámhossz tartományokra. Mindkét szenzor Xenics elektronikával vezérelt. NIR tartományú InGaAs szenzorának dinamikus érzékenysége **12bit**, felbontása **320*256px**, a szenzor és spektrográf (SpecIm ImSpector N17E) mérési tartománya **900nm -1700nm**. VIS-NIR tartományú Silicon CMOS szenzorának érzékenysége **12bit**, felbontása **1280*1024px**, a szenzor és spektrográf (SpecIm ImSpector V10E) mérési tartománya **400nm -1000nm**.

C-mount Schneider–Kreuznach CINEGON 1.4/8-0512 optikát csatolhatunk mind a NIR mind a látható tartományú spektrográfokhoz. Szabályozható, visszacsatolásos, RS-232 protokolon vezérelhető fényforrások (IlluminationTech 3900) fénye üvegszálon és vonalas-optikán keresztül világítja meg a vizsgált egyenest. NIR és látható tartományú változatának spektrumát a beépített Halogén izzó típusa határozza meg. A csak 800 nm felett sugárzó NIR változat fényét kékes jelzőfény teszi láthatóvá. A munkaasztal Y-irányú mozgatása Isel LF4 mechanikával és Isel TMO-4403 (PICMIC) léptetőmotor segítségével történik. A motor RS-485 protokolon vezérelhető 1/80mm felbontással (www.isel.com). A NIR szenzor keltette hő távozását beépített Peltier-cella és külső keringető szivattyú által keringetett hűtőfolyadék segíti. A kamerák spektrális kalibrálásához szükséges csúcsokat az un. „Calibration cube” Higany-Kadmium lámpája szolgáltatja.

Algoritmusom 3 videó forrást ért el: az eszköz két 12 bites szenzorát és tesztelési célokra „Video for Windows” kamerát (3*8 bit felbontással). A VIS-NIR és NIR kamerák Windows API függvényekkel vezérelhetők. Ezen 12 bit felbontású szenzorokon beállítható a kép vizsgált téglalap alapú területe (a gyorsabb ipari alkalmazhatósághoz), a Peltier hűtés vezérlő-értéke és az adatgyűjtés, az AD konverzió számos paramétere. Alapvetően az AD konverzió paramétereinek megfelelő értékei határozzák meg a szenzor megfelelő munkatartományát, működését. Mivel mindkét kamerának, sőt az egyes méréssorozatnak is sajátos inicializáló, kalibrációs és mérés-vezérlési paraméterei vannak, az algoritmusnak lehetővé kellett tenni a mérés paramétereinek szerkesztését, sablon-fájlba történő mentését, visszatöltését.

Az eszközök megnyitása és inicializálása után az eszköz által szolgáltatott $I(x,w)$ képeket és előfeldolgozott adatokat az előre beállított frekvenciával jelenítette meg az algoritmus. Az utolsó feldolgozás (mintavétel, előfeldolgozás, kijelzés) közben eltelt időt szintén ellenőrizte az algoritmus, hogy a beállított mintavételi frekvencia a szenzoron állított integrációs időnek megfelelően kicsi legyen. Túl magas frekvencia-érték beállítása ugyanis az $I(w,x,y)$ hiperkocka szinkronizációs hiba okozta torzulásához vezetne.

4.2.2 Kalibrálás, stabilitás biztosítása

Hiperkocka torzítás-mentességének biztosítása

Először a kamera asztaltól, illetve a mérendő felszíntől való távolságát kell beállítani úgy, hogy a mérni kívánt objektum-típus beleférjen az optika X irányú látóterébe. Ezután lehetett megmérni a látótér X irányú hosszát [mm], amiből az algoritmus kiszámította az X irányú felbontást [mm/pixel]. Eközben állítandó az optika megfelelő fókusza pl. egy nyomtatott fekete-fehér papír kontrasztjának ellenőrzésével. Későbbiekben ismertetett sárgarépa mérések esetében az X irányú felbontás 320pixel/67mm volt.

A látótér W irányú, tehát spektrális határait két monokromatikus fényforrással lehetett beállítani, amelyek csúcsai célszerűen minél távolabb helyezkedjenek el. Kiválasztva a W irányú pozíciókat az X-W képen, ahol a sugárzók csúcsait látjuk, a méréstartomány határait az algoritmus lineáris extrapolációval határozta meg. Több monokromatikus sugárzóval a linearitás is ellenőrizhető.

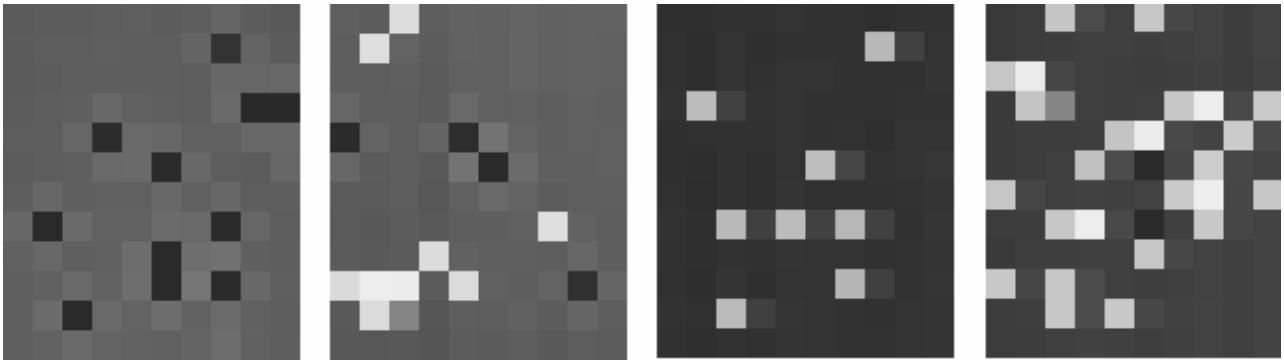
Végül az Y-tábla sebességét kellett szinkronizálni a beállított mérési frekvenciával és az X irányú felbontással, hogy ugyanolyan pixel/mm felbontást kapjunk Y irányban. Tudva készülékünk léptetőmotor-mechanikájának 80step/mm felbontását és a fenti adatokat, az algoritmus kiszámolja a léptetőmotor megfelelő sebességét [step/sec]. Az Y irányban megteendő lépések számát szintén ki kellett számítani a kívánt Y irányú képméretből. Ezzel a módszerrel sikerült torzításmentes és ekvidisztans $I(w,x,y)$ adatkockákat mérnünk.

NIR szenzor "Salt-and-Pepper" zajának kiküszöbölése

Három féle működésképtelen pixelét lehetett megfigyelni a NIR tartomány InGaAs szenzorának:

- Villogó pixelek tapasztalataink szerint az AD paraméterek helyes beállításával kiküszöbölhetők. Az AD paraméterek (munkatartomány, erősítési tényező, stb.) helyes értékeit csak előzetes mérésekkel lehet meg határozni, a számos jellemző értelmezése erősen aluldokumentált volt, továbbá az optimális értékek szenzoronként és mérés-elrendezésenként különbözőek. A helyes értékeket a mérés mellékleteként célszerű menteni, mint ahogy az egyéb kalibrációs fájljait is (pl. sötét felület és világos etalon felület képét, valamint közepes intenzitású képet a működésképtelen pixelek kiválasztásához).
- A rendhagyóan sötét („bebukott”) pixelek (20.a. ábra) homogén világos felület mérésével határozhatók meg. Hatásuk olyan, mint a vízbedobott kőé. Négy szomszédjuk (fent, jobbra, lent, balra) jelszintje a vártnál magasabban van. Két hibás sötét pixel hatása összeadódik (20.b. ábra). A hatás kiküszöbölésére a hibás pixel hiányzó jelszintjének negyedét kell a szomszédos pixelekből kivonni.

- A rendhagyóan világos („kiégett”) pixelek (20.c. ábra) homogén sötét felület mérésével deríthetők fel. Hatásukra a jobbra eső pixeleken exponenciálisan csökkenő intenzitású világos árnyék tapasztalható. Két hibás világos pixel hatása szintén összeadódik (20.d. ábra). A hatás kiküszöbölésére a hibás pixel többlet-jelszintjével arányos értéket kell kivonni a jobbra eső pixelekből a távolsággal exponenciálisan csökkenő mértékben.



20. ábra: Sötét pixelek hatása (a), szuperpozíciója (b), világos pixelek hatása (c), szuperpozíciója (d)

A bebukott pixelek fizikai magyarázata az, hogy az InGaAs szenzor egy szilícium kiolvasó rétegen keresztül csatlakozik a forrasztásokhoz. Néhány detektornál előfordul, hogy nem csatlakozik a kiolvasóhoz, ugyanakkor a beeső fényjel gerjeszti, előfeszíti. Ebben az esetben az látható, hogy a cella a többlet töltését 100%-ban és egyenletesen adja át a szomszédoknak.

A kiégett pixelek magyarázata az, hogy egyes detektorokon, a túl alacsony előtét-ellenállás okozza a megnövekedett sötét-áramot és ezzel a jelszint relatív emelkedését. Az oszlop-puffer vagy a kimeneti erősítő hosszú válaszideje magyarázza az árnyékot.

A képfeldolgozásban használatos zajszűrő algoritmusok (Chan et al., 2005) nem alkalmazhatnak hasonló szabályokat, így erre a feladatra hatásosabb algoritmust kellett fejleszteni:

- Kalibrálásakor a működésképtelen pixeleket azonosítani kell egy közepes intenzitású homogén felület mérésével és a rendhagyóan sötét vagy világos pixelek kijelölésével. A pixeleket előzetes mérés alapján három halmazba (működésképtelen, módosított és megbízható) sorolva javíthatók a mintavételezett képek.
- Mintavételezéskor először a működésképtelen pixelek első közelítését kell kiszámolni a spektrális (függőleges) irányban talált legközelebbi megbízható pixelek értékeiből lineáris interpolációval. Második lépésben a becsült és hibás érték közti különbség alapján kell korrigálni az illető sötét vagy világos pixel szomszédjait. A harmadik lépésben megismételhető a lineáris interpoláció a spektrális (függőleges) irányban talált legközelebbi megbízható vagy módosított pixelek között. Negyedik lépésben ismét korrigálhatók a szomszédok az új becsült érték alapján.

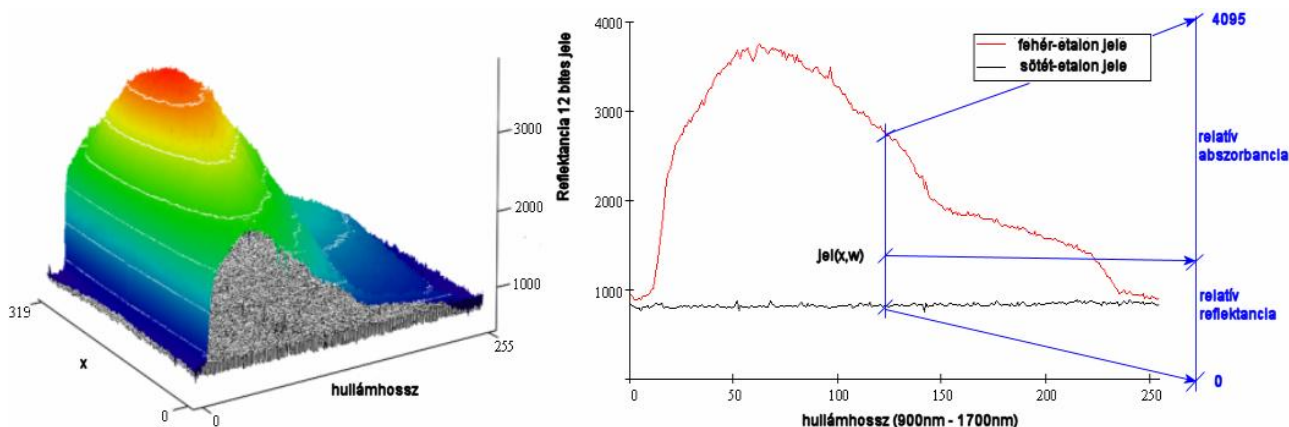
Inhomogén érzékenység kiküszöbölése, munkatartomány ellenőrzése

A mintavételezett Intenzitás(w,x) képek adott (w,x) pontban való spektrális és hely szerinti metszeteit kijelozte az algoritmus az intenzitás eloszlásának ellenőrzésére. Az optika blendéjét lehet beállítani a metszetek segítségével úgy, hogy a jelszint minél magasabb legyen, de a szenzor a legvilágosabb felületen se legyen túlvezérelt. A méréssorozathoz választott világos etalon is a spektrális metszet segítségével ellenőrizhető, hogy minden hullámhosszon nagyobb legyen a reflexiója, mint a mintacsoport elemeinek bármely képpontjái.

A kiválasztott x pont $I(w)$ spektrális metszete fájlként menthető, mint az illető anyag jellemző reflexiós vagy abszorpciós spektruma. Ezt például a következő fejezetben ismertetett adatredukciós operátor spektrális adataként használhatjuk. A kiválasztott w hullámhosszon való $I(x)$ metszet például homogén felület vizsgálatán keresztül a megvilágítás egyenletességének ellenőrzésére szolgálhat.

Sötét- és világos etalon felületek olvasásával kezelhetjük a rendszer inhomogén érzékenységét. A sötét felület mérése letakart optikával történő olvasással valósítható meg. A mért $I(w,x)$ kép a beállított AD paraméterektől, a szenzor sötétáramától függ. Ez a mátrix méréseinkben megfelelően homogénnek és időben stabilnak bizonyult.

Világos etalon méréséhez egy olyan etalon egyenes szakaszát kell mérni, amelynek reflexiója minden hullámhosszon nagyobb, mint a méréssorozat elemei. Fehér etalon felület használható VIS-NIR tartományban és aranyozott felületű rudat használtunk a következőkben ismertetet NIR tartományú mérésben. A mért $I(w,x)$ mátrix homogenitása elsősorban a megvilágítástól és a szenzor spektrális érzékenységétől függ, de függ a beállított AD paraméterektől és a spektrográf spektrális hatásfokától is.



21. ábra: Sötét- és világos felület képe (a), spektrális metszetük és a lineáris transzformáció (b)

A 21. ábrán látható, hogy a NIR méréselrendezés spektrális érzékenysége jelentősen inhomogén volt. A megvilágítás nem volt elég diffúz, ezért a tükröződés hely szerinti inhomogenitást okozott. Az optikai blendéje, vagy az integrációs idő lehetett volna nagyobb, mivel a maximum nem érte el az AD konverzió lehetséges legnagyobb értékét. Az AD paraméterek további optimalásával a sötét felület átlagosan 916 értékének csökkenését, azaz a munkatartomány szélesítését lehetett volna elérni.

A méréselrendezés, megvilágítás, blende és AD paraméterek helyes beállítása után, sötét- és világos etalon képeket mentve, az inhomogenitást kiküszöbölhetjük és a jelszintet is növelhetjük egy, a 12 bit dinamikus felbontást megtartó lineáris transzformációval. Az algoritmus minden képpontra megvizsgálja a jelszint minimális (sötét) és maximális (világos etalon) szintektől való távolságát a következő lineáris konverzió szerint:

$$RR(x) = \frac{x - dark}{bright - dark} \cdot 4095 \quad (10)$$

Ha a két határoló érték (sötét és világos) túl közel van egymáshoz, akkor a transzformáció túl érzékeny lenne a zajokra, így ha a távolságuk kisebb, mint egy előre beállított küszöbérték, akkor a pixelek méréseit nem tekintjük megbízhatónak.

Az algoritmus e pontján lehetett beállítani, hogy relatív reflektanciát (RR) vagy relatív abszorbanciát (RA) kívánunk mérni. Relatív abszorbancia mérése esetén a számlálóban a minimális értéktől való távolság helyett a maximálistól való távolsággal számolhatunk:

$$RA(x) = \frac{bright - x}{bright - dark} \cdot 4095 \quad (11)$$

A „relatív reflektancia” és „relatív abszorbancia” mennyiségeket a továbbiakban ebben az értelemben használom. A reflektancia (R) egyenesen arányos az általam használt relatív reflektanciával, későbbiekben könnyen kiszámolható a mentett képekből, az abszorbancia ($A = \lg(1/R)$) pedig kiszámítható az R reflektanciából.

Stabilitás biztosítása

Habár a rendszer szabályozható, visszacsatolásos fényforrásai különlegesen magas stabilitást (0.1%) ígértek, egyenetlen vagy tükröződő felszín mérésekor nem könnyű homogénen megvilágított elrendezést létrehozni. Külső fényforrással kellett megfelelően diffúz megvilágítást elérni, hogy ne legyen nagy a visszavert fény intenzitásának hely szerinti szórása. Ezen külső fényforrásokra stabilizált tápegység biztosította az időben állandó teljesítményt. Az 50 Hz-es zajt, vagy egyenáramú táplálással és puffereléssel, vagy az integrációs idő megfelelő beállításával lehet kiküszöbölni. Előzetes kísérleteink bizonyították, hogy mérések előtt bizonyos idővel célszerű bekapcsolni a

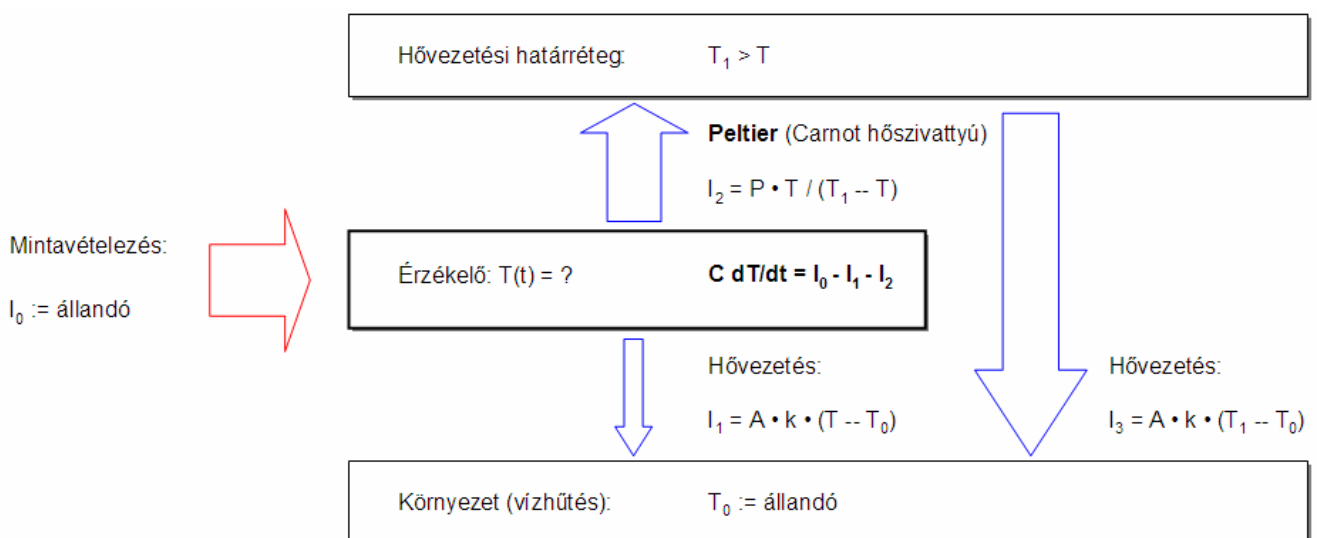
megvilágítást és elindítani a szenzor mintavételezését, az üzemi hőmérséklet stabilizálódásához. Kísérleteinkben 10 perc melegedési időt biztosítottunk.

Szenzor hőmérsékletének stabilizálása

Peltier cella vonja el a szenzor által mintavételezés közben termelt hőt, amit utána a szivattyú által keringetett hűtőfolyadék távolít el a kamerából. A Peltier cella teljesítményét egy API függvényhívással kiküldött vezérlő értékkel lehet szabályozni. Konstans vezérlőértéket használva a mérések időnként kaotikussá váltak, mivel ez esetekben a szenzor hőmérséklete váratlanul kitért az egyensúlyi állapotól. Mintha a szenzor által időegység alatt keltett hő rendszertelenül változna. A hőmérsékletet így szabályozni kellett a vezérlőérték ciklusonkénti beállításával.

A kezdetben használt PID szabályzó algoritmus (proportional-integral-derivative) megfelelő működése a paraméterek helyes beállításán múlik. Működése gyakran kaotikussá vált kis elemszámra, nagy elemszámra pedig túl lomhának mutatkozott. A mért hőmérsékletértékek nagy szórása, kiugró, megbízhatatlan értékei, a szenzor kis hőkapacitása és a rendszer viselkedésének hőmérsékletfüggése okozhatta, a PID algoritmus instabilitását. A szenzor termodinamikai modelljének (22. ábra) megoldásából előbb várhattunk eredményt, mint a PID algoritmus optimalizálásából.

A szenzor által keltett hőt és a környezet hőmérsékletét legalább adott ideig állandónak tekintve a rendszer differenciál egyenletének megoldása az idő kvázi exponenciális függvénye két paraméterrel: a relaxációs idővel és a hőmérséklet telítési értékével. Az utolsó, megadott számú mérés alapján, kizárva a kiugró méréseket, az illesztés után a telítési hőmérséklet becslése alapján állítható a vezérlő érték.



22. ábra: A szenzor termodinamikai modellje

Méréssorozatok összehasonlíthatóságának biztosítása

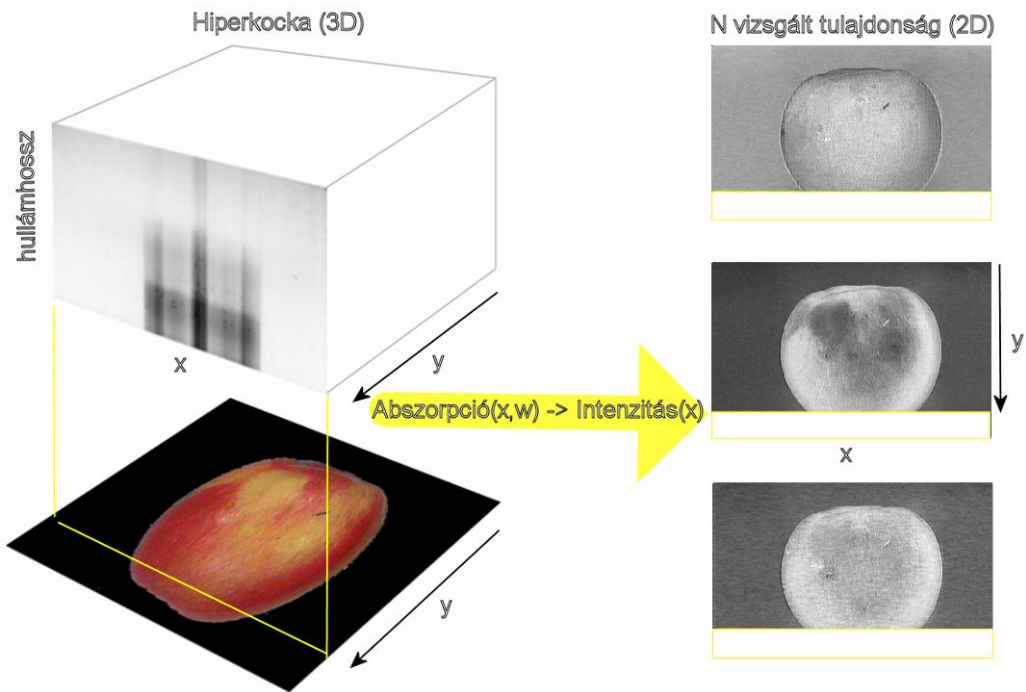
Etalon felület méréssorozatokat megelőző mérésével és az optika blendéjének állításával lehetett elérni a méréssorozatok egymásnak megfelelő jelszintjét.

Különböző reflexiós tulajdonságú (látható tartományban eltérő színű) etalon felületek, méréssorozatokat megelőző mérésével ugyanakkor, a méréssorozatok eredményeinek összehasonlíthatóságát is biztosítani lehet.

- Ha az adott etalonok mért spektruma nem változik a méréssorozatok között, akkor a méréssorozatok eredménye összehasonlítható.
- Ha az összes etalon spektruma ugyanazzal a skalárral való szorzással konvertálható a megfelelő új mért spektrumra, akkor valószínűleg a blende változott, de a mérések összehasonlíthatók.
- Ha az összes etalon spektruma ugyanazzal a lineáris transzformációval konvertálható a megfelelő új mért spektrumra, akkor valószínűleg a megvilágítás változott, de a mérések összehasonlíthatók.
- Máskülönben csak akkor konvertálhatók, ha a mért etalonok vektortere kifeszíti az összes mérés eredményét.

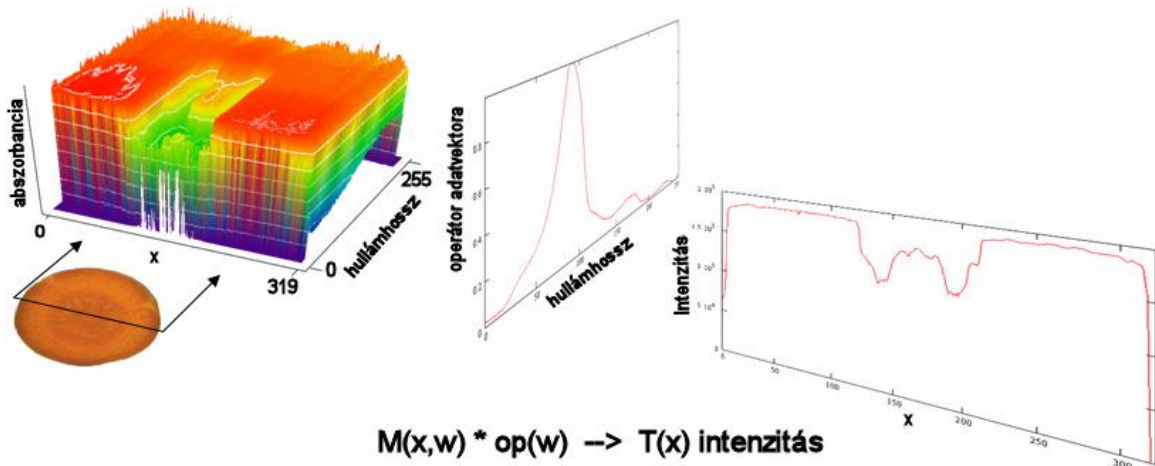
4.2.3 Előfeldolgozás, valós idejű adatredukció

A kutatási feladatra, élelmiszerek spektrális tulajdonságainak laboratóriumi vizsgálatára fejlesztett algoritmus lehetővé tette a hiperspektrális adatok valós időben történő előfeldolgozását, az $I(w,x,y)$ intenzitás hiperkocka adatredukcióját a vizsgált jellemzők $T(x,y)$ tulajdonság mátrixaira. Az aktuálisan mért vonal $I(w,x)$ képét a tulajdonság előre beállított, vektorról skalárra képező operátorával lehet $T(x)$ vektorra redukálni. A vonalra merőlegesen y irányban mozgatva az objektumot a kamera alatt, mérve az objektum következő vonalait, a tulajdonság intenzitását leíró $T(x,y)$ mátrixot lehetett felépíteni. Ezen mátrix felépítését pseudo-képként valós időben jelenítette meg az algoritmus mutatva a tulajdonság hely szerinti eloszlását. Az algoritmus egyszerre több tulajdonság, pl. víz-, olaj, fehérje-tartalom hely szerinti eloszlásának vizsgálatát és megjelenítését lehetővé tette. A tulajdonságok eloszlását leíró $T(x,y)$ mátrixok elmenthetők későbbi hagyományos képfeldolgozó analízisre (23. ábra).



23. ábra: Adatredukció, lényegkiemelés illusztrációja

A lényegkiemelés legegyszerűbb példája látásunk színérzékelése, adatredukciója. A mért spektrumokat az R,G,B szűrőkkel (CIE 1931 érzékenységi görbéi) skalárisan szorozva kapjuk az alapszínek intenzitását leíró három skalárt. A fejlesztett mérőszoftver ehhez hasonlóan teszi lehetővé az előfeldolgozást. A felület pixeleinek spektrumát például a színlátáshoz hasonlóan adott $op(w)$ vektorral is szorozhatjuk (24. ábra).



24. ábra: Víz abszorpciós spektrumával való skaláris szorzás eredménye

A skaláris szorzás operátor, a mért spektrumot adott szélességű konstans vagy eloszlás $Op(w)$ függvénnyel szorozva alkalmas az egyes spektrális tartományok kiemelésére, de az összetevők jelenlétének becslésére ennél kifinomultabb módszereket kell alkalmazni. Az optimális vektorral skalárisra képező, lényegkiemelő operátort a chemometriában mintacsoport mérésével és az adatok

matematikai-, statisztikai vizsgálatával fejezik ki. Ehhez hasonló tanulómintás algoritmust lehet alkalmazni a hiperspektrális mérésnél is.

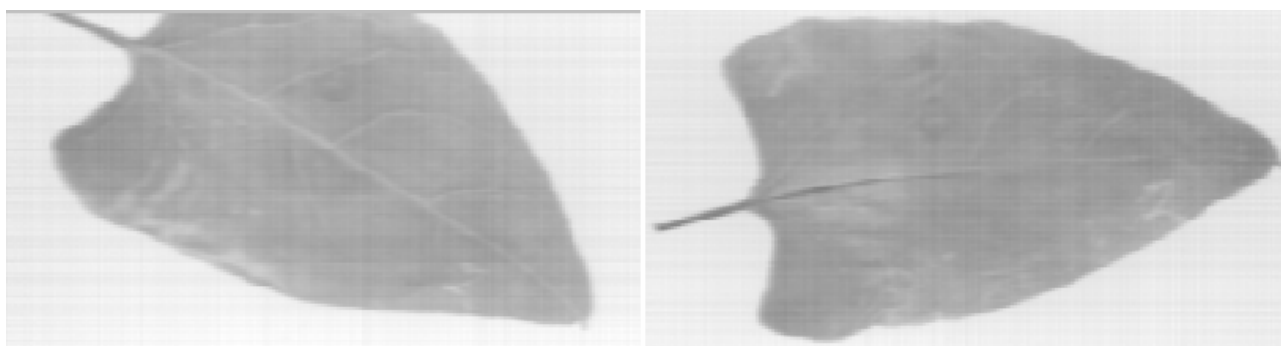
A mért spektrumot redukáló operátor (pl. szorzás) spektrális adatvektorának megválasztása szintén kérdéses lehet. Adott kémiai összetevő, mint víz, olaj vagy zsír koncentrációjának becslésére először a keresett tiszta anyag abszorpciós vagy reflexiós spektrumait vizsgáltuk meg. Spektrofotométeres méréseink eredményeit, illetve spektrális könyvtárak adatait Mathcad alkalmazás (MathSoft, 1994) transzformálta (interpoláció és resample) NIR érzékelőnk hullámhossz tartományára és felbontására. Ismert koncentrációjú minták mért abszorpciós spektrumai azonban nem korreláltak a tiszta anyag jellemző spektrumával.

A szakirodalom szerint adott közegben az összetevők komplex kötésekben helyezkednek el a mátrix molekuláival, megváltoztatva a tiszta összetevő jellemző vibrációs-rotációs NIR/NIT abszorpciós sajátértékeit. Ennek következtében a tiszta anyag abszorpciós csúcsai nem mérhetők, a jellemző csúcsokat abban a közegben kell definiálni, ahol mérni szeretnénk.

Az optimális adatredukációs operátor meghatározásához tehát olyan tanuló-minták spektrumát kell először mérni, amelyekre az adott tulajdonság (pl. víztartalom) ismert. Az optimális operátort ezután statisztikai módszerekkel lehet meghatározni. A következő fejezet arra mutat példát, hogyan lehet meghatározni a víz-összetevő operátorát a tárolt sárgarépa szöveteinek nedvességtartalmának becslésére.

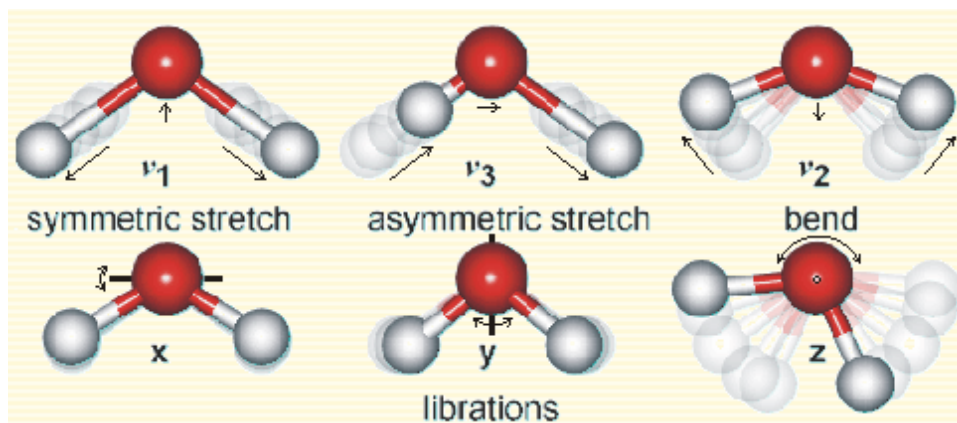
4.2.4 Alkalmazás répaszövetek nedvességtartalmának becslésére

Élelmiszerek számos összetevőjének koncentrációja becsülhető a felület NIR tartományú mérése alapján. A 25. ábrán egy levél átlagos abszorpciója (900-1700nm) látható „in vivo” és 24 óra elteltével. A pszeudo-képekről az látszik, hogy még az átlagos abszorpció operátor is érzékeny a víztartalom változására. Amíg az átlag nem változott a felület nagyobb részén, az ereken jelentősen csökkent a száradás után, valószínűleg azért, mert az erekből, mint nyitott csatornákból könnyen távozott a víz. Ez mutatja a hiperspektrális módszer alkalmazhatóságát komplex növényi és állati szövetek mérésére, ahol a szövetek egymáshoz képest eltérő viselkedése, változása további információt jelenthet. Másrészt, az átlagos abszorpció operátor nem emel ki adott frekvenciát, így a víztartalom becslésére ennél sokkal alkalmasabb operátort is meg lehet határozni.



25. ábra: Száradó levél átlagos abszorpciójának (950-1750nm) változása 24 óra eltelte után

A NIR tartományban jól mérhető víz abszorpciós csúcsok teszik ideális és gyakran használt eszközzé a mérési módszert nyersanyagok vagy késztermékek nedvességtartalmának mérésére. Internetes adatbázisokból letöltött víz abszorpciós spektrumok (1968 Irvine-Pollack; 1974 Palmer-Williams; 1978 Querry-Cary-Waring; 1981 Segelstein; 1989 Wieliczka-Weng-Querry; 1993 Kou, Labrie, Chylek) hitelességét Mathcad alkalmazással ellenőriztem, azokat közös hullámhossz-tartományra és felbontásra konvertálva. Algoritmusom természetes köbös spline görbével közelítette az illető spektrum mérési pontjait, majd kiválasztva az érdekelt hullámhossz-tartományt (950-1750nm), a szenzornak megfelelő felbontásban (256 adat) tárolta a görbét.

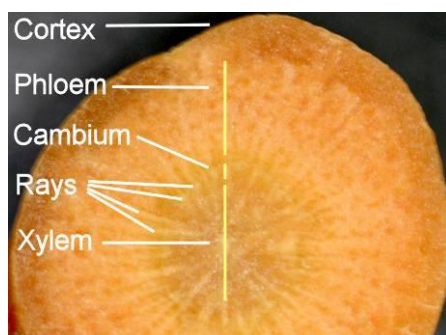


Assignment of the IR vibrational absorption spectrum of liquid water

Wavelength	cm ⁻¹	Assignment	Wavelength	cm ⁻¹	Assignment
0.2 mm	50	intermolecular bend	1470 nm	6800	$a\nu_1 + b\nu_3; a+b=2$
55 μm	183.4	intermolecular stretch	1200 nm	8330	$a\nu_1 + \nu_2 + b\nu_3; a+b=2$
25 μm	395.5	L ₁ , librations	970 nm	10310	$a\nu_1 + b\nu_3; a+b=3$
15 μm	686.3	L ₂ , librations	836 nm	11960	$a\nu_1 + \nu_2 + b\nu_3; a+b=3$
6.08 μm	1645	ν_2 , bend	739 nm	13530	$a\nu_1 + b\nu_3; a+b=4$
4.65 μm	2150	$\nu_2 + L_2$	660 nm	15150	$a\nu_1 + \nu_2 + b\nu_3; a+b=4$
3.05 μm	3277	ν_1 , symmetric stretch	606 nm	16500	$a\nu_1 + b\nu_3; a+b=5$
2.87 μm	3490	ν_3 , asymmetric stretch	514 nm	19460	$a\nu_1 + b\nu_3; a+b=6$
1900 nm	5260	$a\nu_1 + \nu_2 + b\nu_3; a+b=1$	Note that a and b are integers, ≥ 0 ms.		

26. ábra: Folyékony víz jellemző abszorpciós csúcsai (Büning-Pfaue, 2003)

A konvertált spektrumok hasonlóan bizonyultak és azt mutatták, hogy a szakirodalomnak megfelelően, a víz jellemző abszorpciós csúcsa a tartományon belül, 1200nm-nél és 1443 nm-nél található (26. ábra, Büning-Pfaue, 2003). A víz detektálása a 900 – 1700nm-es tartományban tehát ígéretesnek mutatkozott, de az előzetes mérések azt mutatták, hogy a száradó répa nem mutatott kiemelt változást 1200nm és 1443nm-en. Az egy hullámhossznál történő mérésnél hatékonyabb operátort kellett találni a száradó sárgarépa szöveteinek mérésére.



27. ábra: A sárgarépa keresztmetszete és szerkezete

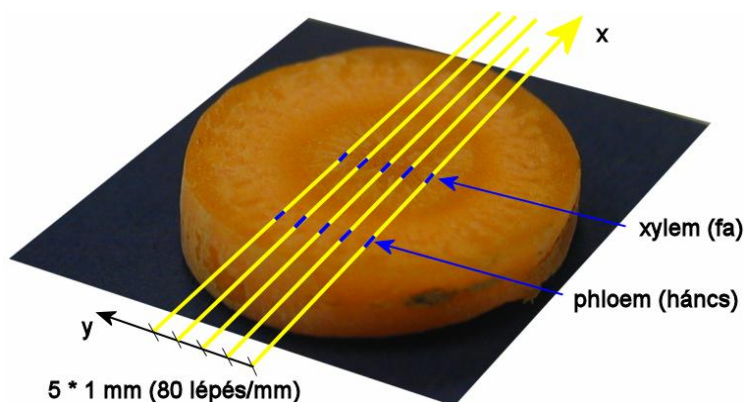
A NIR technikában használatos módszer, a vizsgált anyag őrleményének vizsgálata a feladatra nem volt célszerű, mivel nem írja le a különböző szövetek viselkedését, de a módszer technikai probléma miatt sem volt alkalmazható. A sárgarépa őrlemény a phenol összetevők enzimatis oxidációja miatt rendkívül hamar látványosan barnulni kezdett.

Répaszeletek spektrális tulajdonságait mértük a hiperspektrális képfeldolgozó rendszerrel. A kísérletsorozat célja, a mérési környezet tesztelésén túl, az egyes fajták és szövettípusok (27. ábra: phloem, azaz háncs és xylem, azaz fa) spektrális viselkedésének vizsgálata volt, az eltelt száradási idő és a nedvességtartalom függvényében. A két éve tartó kísérletsorozat során, az elégséges és stabil jelszint elérésére, a felmerülő problémák megoldására párhuzamosan fejlesztettem, tökéletesítettem a mérési környezetet, azaz szoftvert és mérésutasítást, valamint számos tárolási körülményt és kísérleti elrendezést kipróbáltunk. A szárítási feltételek meghatározásánál a természetes körülményeket minél jobban modellező, kíméletes szárításon túl, szempont volt az aktuális méréshez rendelkezésre álló idő. A kísérletekhez, kényszerűen, az adott időszakban elérhető répafajtákat használtuk fel. Ezzel magyarázható, hogy a sok tucat kísérletből bemutatott 3 kísérleti eredmény egyes feltételei és a választott fajták különbözhetnek.

A mérésorozat első bemutatott kísérlete során Barbara és Nevis fajták szeleteit vizsgáltam, a nedvességtartalmat leíró operátor meghatározásához. Ennél a mérésorozatnál szárító-szekrényben, 30°C-os, kvázi mozdulatlan levegőn tároltuk a mintacsoportot. Az egyedek nedvességtartalmát és

spektrális tulajdonságait mértük óránként, összesen hétszer. A nedvességtartalmat az egyedek óránkénti tömegmérésével és a mérésorozatot követő teljes kiszáritás utáni tömegméréssel határoztuk meg (MSZ EN 12145:1998). A fejlesztett mérőszoftver segítségével az egyedek középső harmadából vágott szeletek meghatározott vonalainak $I(w,x)$ mátrixait mértük és mentettük időről időre. Az objektum pozicionálása a következő vonal újbóli vizsgálatához, a léptetőmotor vezérlésével történt.

A mérésorozat után Mathcad algoritmusom dolgozta fel a mentett $I(w,x)$ spektrális adatokat, automatikusan kiválasztva a képeken az objektumot és a vizsgált szövettípusok (phloem és xylem) képpontjainak spektrumait (28. ábra). Az algoritmus megvizsgálta a különböző fajták (2 csoport) és szövettípusok (2 csoport) spektrumainak (3 egyed 5 vonalának adott szövettípuson 1mm szélességben mért pontjai) szórását adott időpontra és megváltozását a száradási idő függvényében.



28. ábra: Az algoritmus automatikusan választotta ki a szövettípusok képpontjait

Az első bemutatott kísérlet, a vizsgált szövetek spektrum alapján történő osztályozhatóságának eredményén túl, egy kiküszöbölendő problémát vetett fel. A vágás által sérült felület, a sérült sejtek gyors kiszáradása miatt, látványos fehéredést, NIR tartományban az abszorpció spektrálisan homogén csökkenését mutatták.

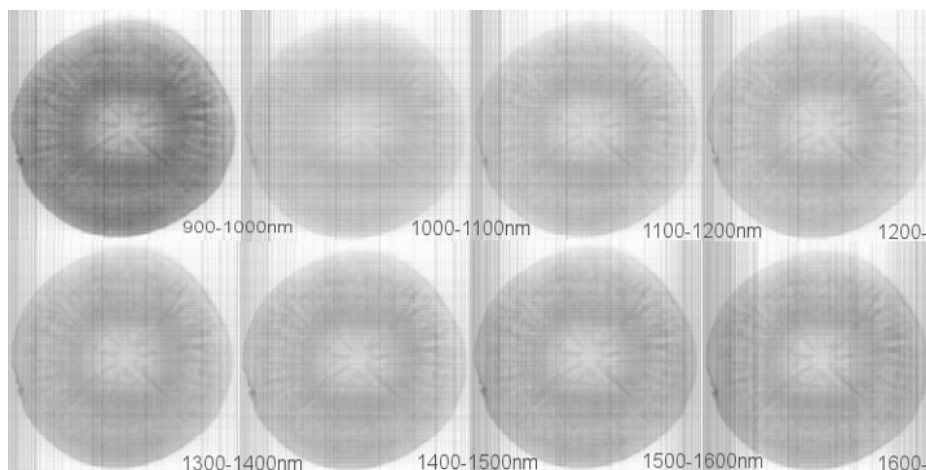
A mérésorozat második bemutatott kísérletében, a felületi, roncsolt réteg homogén fehéredésének kiküszöbölésére, az egyedek újbóli mérésekor friss vágásfelületet kellett vizsgálni. Ez egyben azt jelentette, hogy bármilyen kicsinek válasszuk is a következő szelet vastagságát, már nem ugyanazt a pontot mérjük újra, így az eredmények csak statisztikailag elemezhetők.

A kísérlet során 5 egyed szövettípusainak spektrális viselkedését vizsgáltam száradás közben a mérés javított kondicionálásával. A spektrálisan vizsgált és a tömegméréshez használt kontrolcsoport egyedei 5-ször 90 percig száradtak 30°C hőmérsékleten, 34,5-32,8 % relatív páratartalom, kvázi mozdulatlan levegőn. Száradás közben műanyag fóliával gátoltuk meg a vizsgált rész (29. ábrán balra) hosszirányú száradását.



29. ábra: A fóliával takart bal oldali rész a következő vágás előtt

A nedvességtartalom változását nem csak a spektrálisan vizsgált, tehát szeletelt, de azonos számú kontrol-csoport tömegmérésével is ellenőriztük. 90 percenként, a nedvességtartalom származtatásához szükséges tömegmérések után, a középső harmadból vágott szeletek friss vágásfelületének 5, egymástól 1mm távolságra lévő egyenesének $I(x,w)$ mátrixát mértük. A későbbi ellenőrzéshez, szeletenként 8 elő-feldolgozott, adatredukált $I(x,y)$ képet, a 900-1700 nm tartomány 100 nm széles résztartományait konstans súlyokkal kiemelő operátor eredményeit mentette az algoritmus (30. ábra).



30. ábra: Példa a 100 nm széles tartományokat kiemelő pszeudo-képekre

A mérésorozat után Mathcad algoritmus dolgozta fel az 5 egyed, 6 szelet, 5 vonalának mentett $I(x,w)$ fájljait, a képeken az x koordináta mentén kiválasztva az objektumot, azon a vizsgált 2 szövettípus (phloem és xylem), egy-egy 3 mm-es szakaszának 21 mért spektrumát.

A kód transzformálta a mért relatív abszorbanciát, az irodalomban megszokott abszorbancia mennyiségre, majd statisztikát készített a spektrumokra szövettípus, valamint eltelt száradási idő szerint. Mivel a transzformáció erősen kiemelte a spektrumok magasabb hullámhosszakon történő eredetileg egy-két kvantumosan monoton változását, szükségessé vált a képek normálása. Az $I(x,w)$ képeken az x koordináta mentén kiválasztva az objektumot a háttér átlagos intenzitása alapján voltak normálhatók a spektrumok, ezzel erősen csökkentve a spektrumok szórását.

A szövettípusokat és a száradási időt jellemző adatredukciós operátorok számításához, a Mathcad algoritmus gyűjtötte össze a spektrumokat és csoportot jelző változókkal együtt mentette statisztikai programmal kiértékelhető adatfájlokba.

Mind szövettípusra, mind száradási időre először Diszkriminancia analízissel (DA: Discriminant Analysis) igazoltam a csoportok szétválását. Ehhez SPSS v15.0 statisztikai szoftvert használtam. A Fisher együtthatók lehetővé teszik a csoportok szétválasztását.

A szétválasztásra jellemző hullámhosszakat U-teszt statisztikai függvénnyel határoztam meg MS Excel táblázat-kezelőben. A függvény meghatározza a csoportátlagok közötti szignifikáns különbséget adott hullámhosszra.

A szignifikáns hullámhosszakat parciális legkisebb négyzetek módszerével (PLS-1: Partial Least Squares) is meghatároztam. Ehhez Unscrambler v9.1 statisztikai szoftvert használtam. A módszerrel nyert főkomponens-együtthatók (latent variable loadings) magas értékei jelzik a szignifikáns hullámhosszakat.

A regressziós együtthatók magas fluktuációja azt eredményezheti, hogy az ilyen hullámhosszakon végzett mérés instabil lehet. Az operátor stabilitása érdekében a Mathcad algoritmus törtvonal illesztésével jelölte ki azokat a szignifikáns hullámhosszakat, amelyek környezetében a regressziós együtthatók fluktuációja minimális.

Módszert dolgoztam ki a hiperspektrális mérések kalibrálására, a szenzor hibáinak korrigálására, az adatok valós-idejű redukciójára. A vizsgált tulajdonságot kiemelő adat-redukciós operátort előzetes mérések eredményeinek statisztikai analízisével határozom meg.

5 *Eredmények*

A fejlesztett, RGB képfeldolgozó algoritmusokat implementáló szoftver feladatai:

- a kalibráció segítése, a megfelelő jelszint beállítása
- a videó-forrás képének elő-feldolgozása (digitális zoom, színrendszer szűrők, zajcsökkentés), a képek kötegelt felvétele,
- a képek akár kötegelt feldolgozása (szelekció, szín-, felület-, alak leírása), valamint
- oktatási feladatokra egyes képfeldolgozási algoritmusok, szűrők szemléltetése.

Verzióit (Stat for DOS16: 1991-1995, Stat2 for DPMI32: 1996-1997, ImgPro for Win32: 1998-), az egyes célprogramokat (Circle, Polar, Reflexion, Target), valamint más adatelemzésre fejlesztett algoritmusaim (Cluster, FileFFT, Debi, MBPN, Cell) számos tanszéki kutatási- és ipari minőségellenőrzési feladatban, PhD és diploma-munkában referáltan alkalmazták.

Az algoritmusokat implementáló szoftver első tanszéki alkalmazásai gyümölcsök színének látórendszeres minősítését valósították meg (Felföldi et al., 1994). Később egyéb termények és élelmiszeripari anyagok színének és alakjának paramétereit határozták meg segítségével. Az algoritmussal nyert, szint és alakot leíró redukált adatokat általában statisztikai analízisnek vetették alá, de egyes alkalmazások sikerrel használták az adat-analízis célra implementált egyéb numerikus analízis szoftvereimet is. 1994 óta számos tanszéki és egyéb publikáció bizonyítja az képfeldolgozó algoritmusok hatékonyságát.

Munkám mérés technikai tárgyú, módszertani jellegű, ezért a trikromatikus képfeldolgozó módszerek többségét az eredmények első három fejezetében ismertetem. Mivel a képfeldolgozási algoritmusok hatékonyságát általános esetre nem, csak speciális objektumra és feladatra lehet bizonyítani, a módszerek eredményességét a fejezetek végén, néhány publikált, statisztikai módszerekkel igazolt, sikeres alkalmazás felsorolásával kívánom illusztrálni, bizonyítani.

Az eredmények negyedik fejezetében, az anyag és módszer fejezetben ismertetett, fejlesztett hiperspektrális képfeldolgozó mérési környezet alkalmasságát bizonyítom és a real-time adatredukció módszertanát illusztrálom egy alkalmazással. Sárgarépa-szeleteken, a különböző szövet-típusok azonosítására és a száradási idő becslésére kívánok optimális spektrális lényegkiemelő operátort meghatározni.

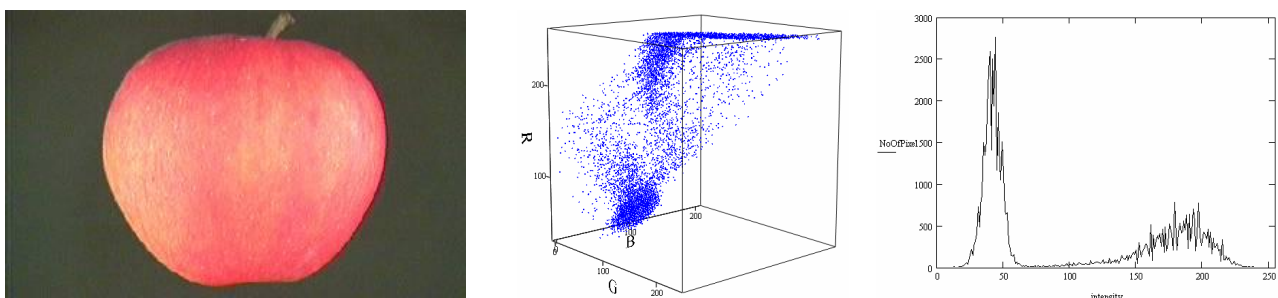
5.1 Szegmentálás

A vizsgálandó objektum kiválasztásának célkitűzése az, hogy a 3-dimenziós képjellemező-tér alapján a kép egyes pixeleit természetes számokkal azonosított objektumokhoz vagy a nullával jelölt háttérhez soroljuk.

Képjellemező, azaz „feature” alatt a képpontokhoz (pixel) rendelt tetszőleges, 0-tól 255-ig kvantált, skalár függvényt értek. Ez lehet a hardver vagy egyéb képforrás jele, esetünkben 8 bites R, G és B, illetve operátorral származtatott (pl. textúra, frame-ek közötti változás, színrendszerek, stb.) függvény. A továbbiakban módszereimet a 3 dimenziós RGB tér alapján ismertetem.

5.1.1 Kiválasztás, festés, zajszűrés, morfológia

Kézenfekvő globális módszer az **objektum pixeleit intenzitás alapján kiválasztani**. Ehhez először meg kell határozni a küszöbértéket (threshold). Világos objektum, sötét háttér esetén e fölötti, ellenkező esetben ez alatti intenzitású képpontot tekintünk az objektum részének. Dokumentált képfeldolgozó eljárás, az intenzitás ($I=R+G+B$) hisztogramján, a háttérnek és az objektumnak megfelelő két jellemző csúcsot (modust) szétválasztó minimumhely keresése (31. ábra). Az irodalomban megtalálható, normál eloszlásokat feltételező algoritmus (Álló, 1985) és annak rekurzív variánsai helyett, gyorsabb és hasonlóan eredményes módszeremmel keresem a küszöböt. Az algoritmus mozgóátlaggal addig mossa össze a szomszédos adatokat (erózió), amíg a megadott számú minimumhelyet nem kapjuk. Módszerem alkalmas arra, hogy akár több csoportra bontson.



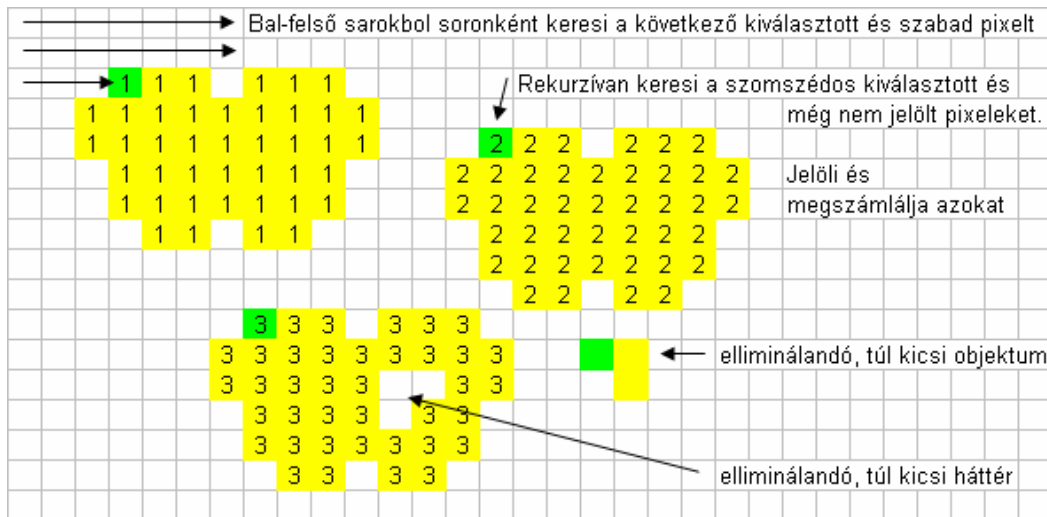
31. ábra: RGB kép (a), színvektorok az RGB térben (b) és az intenzitás hisztogramja (c)

Festő algoritmust fejlesztettem ki arra, hogy egy megtalált pixel azonos osztályba sorolt szomszédjait az elsővel megegyező sorszámúra színezzon egy maszk-táblán. Az algoritmus minden azonos osztályú, még nem jelölt pixelt rekurzívan jelöli a maszk-táblán az osztály azonosítójával és festés közben készít statisztikát, megjeleníti a pixelt, vagy végrehajt parancsot az osztály pixelein.

Algoritmusom a bal-felső sarokból soronként keresi a következő kiválasztott és nem vizsgált pixelt:

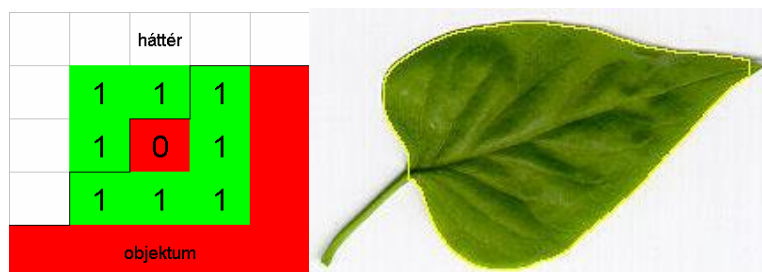
- Annak a következő, 0-nál nagyobb azonosítót adja (1...) és ezzel jelöli a maszk-táblán.
- Rekurzívan jelöli ugyanezen azonosítóval a pixel kiválasztott és még nem vizsgált szomszédjait

Kiküszöbölendő a zajokat, következő függvényem beolvasztja az adott méretnél (pixel-szám) kisebb szigeteket környezetébe a maszk-táblán. A festőalgoritmus első futása során számított statisztika alapján, a túl kicsiny szigeteket egy második festéssel lehet átszínezni (32. ábra).



32. ábra: Festő algoritmus és zajsűrés sémája

A **körvonal simítását** a képfeldolgozásban ismert morfológiai operátorok (Jahne et al., 1999) használatával végzem. „Nyitásnál” (opening) adott számú hámozással (erosion) és növesztéssel (dilation) eltüntethetők az objektum konvex részletei (félszigetek). „Lezárásnál” (closing) a lépéseket fordított sorrendben végrehajtva a konkáv részletek (öblök) simíthatók. Az első sorrendre példa, amikor egy levélnyelet, avagy a paprika kocsányát kell eltüntetni a kiválasztott objektumból és csak a maradékot vizsgálni. A 33. képen illusztrált algoritmus adott pixelre (piros) az 1 sugarú környezetet (9 zölddel jelölt pixelt) vizsgálja meg, és hámozásnál a háttérhez csatolja a pixelt, ha talál háttér szomszédot, növesztésnél pedig az objektumhoz csatol, ha talál objektum szomszédot.



33. ábra Morfológiai operátor és eredménye (5*hámozás + 5*növesztés)

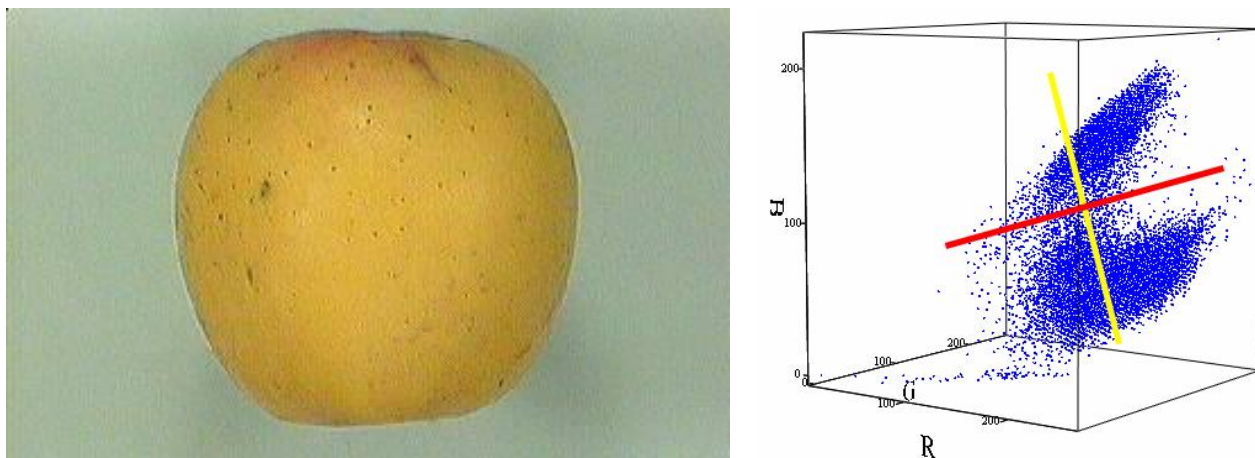
5.1.2 Kiválasztás hatékonyságának javítása statisztika alapján

Az objektumok kiválasztása hagyományos küszöbölési technikával még laboratóriumi körülmények között sem mindig lehetséges. „In vivo” alkalmazások még inkább igénylik hatásosabb technikák használatát. Haszon- és gyomnövények szántóföldi látórendszeres azonosításánál és pozicionálásánál (Firtha, 1998) különösen nehéz feladat a levelek kiválasztása. A levelek kis mérete és a kamera véges felbontása miatt még fontosabb a kiválasztó algoritmus megbízhatósága.

Arra az esetre, amikor a háttér és az objektum pontjait az intenzitás nem, de a szín jól elválasztja, fejlesztettem ki a módszert, melynél a \underline{c} színvektort a felhasználó által beírt \underline{d} vektorral skalárisan szorozva kapjuk a hisztogram célfüggvényét (34. ábra):

$$\underline{I} := \underline{c} * \underline{d} \quad (12)$$

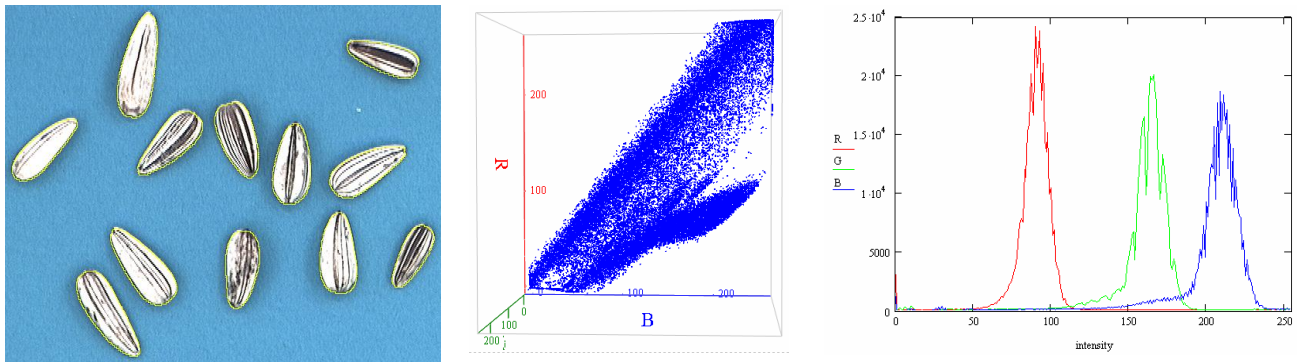
Az intenzitás helyett a \underline{c} színvektorok \underline{d} -re való vetületét tekintem célfüggvénynek.



34. ábra. Kép pontjait a pirossal jelölt sík, azaz a sárgával jelölt irány választja szét optimálisan

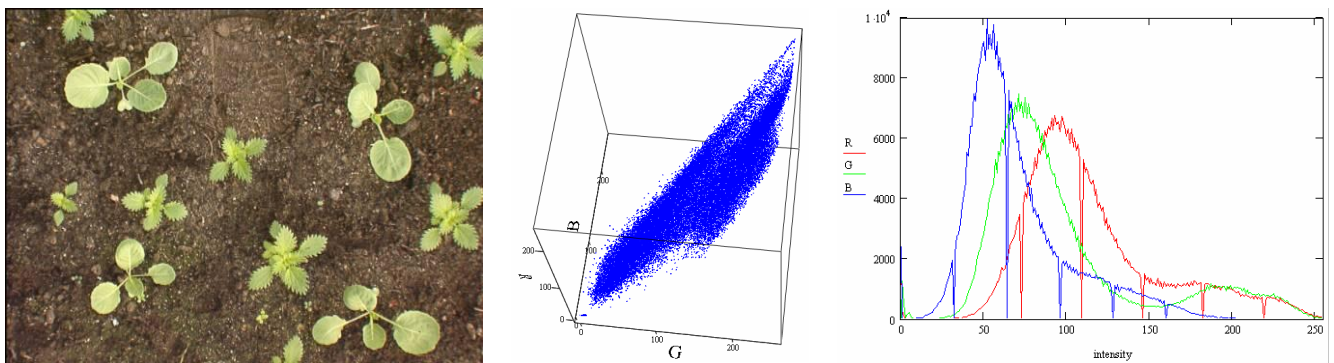
Adott képet optimálisan szétválasztó \underline{d} irány, az ábrán látható ideális esetben **automatikusan** is számítható. RGB térben ábrázolva egyes pixelék színvektorait, meg kell keresni a pontfelhő legjobban szétválasztó irányt, azaz jó esetben egy ellipszoid, ideális esetben egy súlyzómodell hossz tengelyét. Ezen irány kiszámításához az alapstatisztikán túl (átlag, szórás), az RGB koordináták között eltérés-szoratósszeget (SQ) és korrelációt kell számolnom (Ezekiel and Fox, 1970). A mérőszoftver alkalmazásaiban leggyakrabban ezt, az automatikus, tehát legkényelmesebb szegmentálási algoritmust alkalmazzák.

Azon esetekben, amikor a pontfelhők rétegei szorosan egymás mellett helyezkednek el, a szétválasztó \underline{d} irány csak **manuálisan** állítható be. Ilyenkor \underline{d} értékét a képcsoportok vizsgálatával, például tanulóminták statisztikai analizésével határozhatjuk meg



35. ábra. Fekete-fehér objektum (a), szétváló pontfelhők (b), optimális irány hisztogram alapján (c)

A mintaképen fekete-fehér objektum (35.a. ábra), az $R=G=B$ testátló mentén elhelyezkedő színvektorait kell megkülönböztetni a közepes intenzitású kék háttértől. A komponensek hisztogramjai alapján a zöld komponens nem használható szétválasztásra (súlytényezője legyen nulla), a piros és kék komponensek viszont ellentétes előjelű súlytényezővel számolandók (35.c. ábra). A pontfelhőket tehát az $R+B=255$ irány választja szét, így az optimális irány a fenti képre: $\underline{d} = \{-1, 0, 1\}$



36. ábra: „In vivo” alkalmazás (a), szétváló, de görbült pontfelhők (b), hisztogram (c)

Az ismertett globális módszer korlátja, ha például „in vivo” alkalmazásnál, inhomogén háttér esetén az objektum pontfelhője nem különül el megfelelően a háttér pontjaitól (36. ábra). Az ábrán az RGB térben két szorosan egymás mellett elhelyezkedő, görbült pontfelhőt látunk. A felületek kis távolsága és görbültsége miatt nem jelölhetünk ki tökéletesen szétválasztó irányt. A hisztogram alapján az $R+B=255$ iránytól várhatunk részleges eredményt (36.c. ábra), vagy nem lineáris topológia meghatározásától.

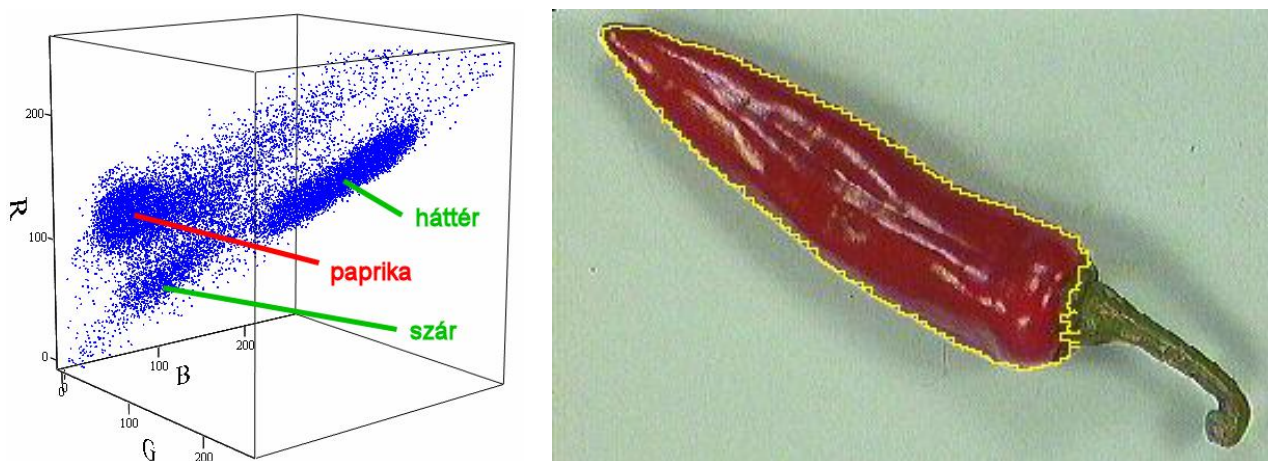
5.1.3 Klaszter-analízis automatikus és tanulómintás alkalmazása

Következő globális módszer a klaszter-analízis. Ennek korábban egy „**split and merge**” klónját fejlesztettem ki. Utóbbi algoritmusom ciklusa n csoportból indul:

- kiszámítja a súlypontokat és statisztikát az egyes csoportokra
- ha kevesebb a csoport, mint amennyit várunk, a túl elnyúltakat szétbontja
- ha több a csoport, mint amennyit várunk, a túl gömbszerűket összeolvasztja

Mivel esetünkben nem a legnagyobb kiterjedésű homogén foltokat, hanem adott objektum-típust szeretnénk felismerni, a későbbiekben a klaszter-analízis **tanulómintás** változatát választottam.

A szoftver-felületen beállítható következő kiválasztási algoritmusnak meg lehet adni **példákat** (tanulóminta képeken egérrel kijelölt téglalapok átlaga) az objektumra és a háttérre is. A későbbi osztályozás során minden képpont színvektorára meghatározom, hogy melyik mintához van közelebb Euklideszi távolság alapján, így az objektumhoz, avagy a háttérhez tartozik. Módszerem alkalmas arra, hogy például egy paprika képéből a terményt a szár nélkül jelölje ki, holott a szár is zöld, mint a háttér, csak sötétebb, a terményen lévő tükröződés pedig világosabb, mint a háttér (37. ábra).



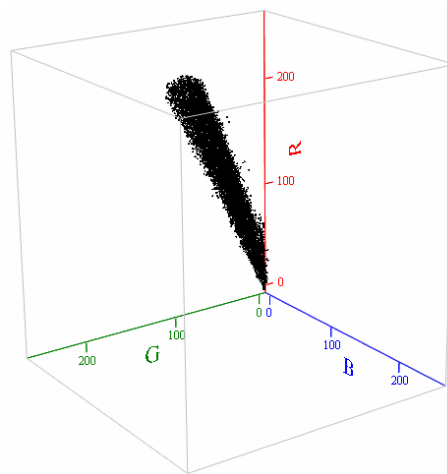
37. ábra: Paprika színvektorai három nagyobb csoportot alkotnak az RGB térben

Az algoritmus még így is érzékeny a megvilágítás geometria okozta inhomogenitására. Az alábbi ábrán bemutatott fermentált Virginia dohányleveleket csak halmazban tudtuk lemérni, így számolnunk kellett azzal, hogy az intenzitás hely szerinti eloszlása nem, csak az átlagintenzitás hordoz a felületre jellemző információt (Firtha et al., 2005).

A 38. ábrán látható, hogy a képpontok színvektorai nem térszögben, hanem egy egyenes mentén egyenletesen helyezkednek el. Hasonló típusú objektumok (pl. dió, lásd 5.2.2. fejezet) képpontjait úgy lehet hatásosan kiválasztani, ha a színtávolságot úgy definiálom, mint adott egyenestől való távolságot.

Ezért bármely kiválasztott mintát értelmezhetünk úgy is, mint **színirányt**. Ebben az esetben a távolság a színvektorból a minta által meghatározott egyenesre bocsátott merőleges hosszát jelenti. Ezt a távolságot a kérdéses képpont ***c*** színe és a ***d*** minta vektoriális szorzatából számolom:

$$\text{távolság} = | \underline{c} \times \underline{d} | / | \underline{d} | \quad (13)$$

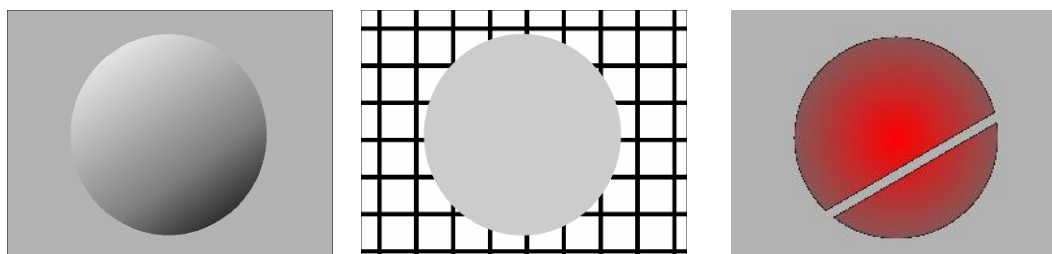


38. ábra: Látszólag inhomogén felület színvektorai egyenes mentén helyezkednek el az RGB térben

A távolság kétféle definíciója, azaz ponttól vagy egyenestől való távolság összehasonlítható, azaz algoritmusomban vegyesen is alkalmazható.

5.1.4 Egyéb lokális kiválasztási módszerek

Az eddig ismertetett, általam globálisnak nevezett módszerek egyike sem képes kezelni az objektum vagy háttér inhomogenitását (39. ábra). Erre csak lokális módszer képes.



39. ábra: Csak lokális módszerekkel osztályozható mintaképek

Nem vállalható fel az egyéb kiválasztási módszerek ismertetése, akár csak felsorolása sem (Tzay and King-Sun 1986; Jahne et al. 1999). Néhány, méréseink esetében alkalmazható algoritmust implementáltam és teszteltem:

1. szomszédság-elemzés: a távolság definiálása után rekurzív algoritmus bontja szigetekre a képet
2. élkeresés: az élgyanús pontok kiemelése után heurisztikus módszerek keresik meg az elválasztó éleket

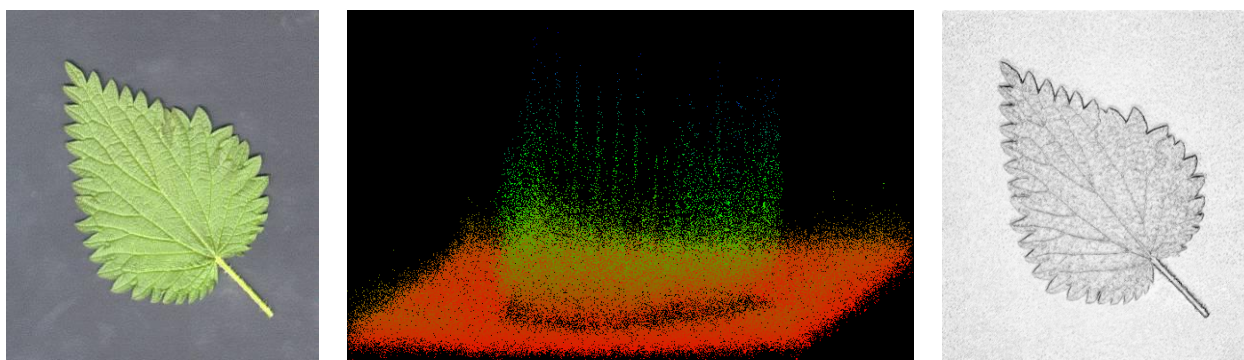
Utóbbi módszerhez 43 szakirodalomban fellelhető és saját élkiemelő algoritmus sok variánsát implementáltam és próbáltam ki, pl: Laplace, Point, Soebel, Best Plane, Roberts, NonmaximaSuppression, Nevatia-Babu, Ray-curve, stb... A módszereket beépítettem a fejlesztett mérő-szoftverbe és mintaképeken teszteltem. Hasonló algoritmusok hatékonyságának leírására nincs általános számszerű jellemzési lehetőség, mivel hatásfokuk függ a kép tartalmától, de a tesztképeken ellenőriztem, hogy

- az algoritmus minél nagyobb kontraszttal emelje ki az éleket
- nyomja el a zajokat, azaz olyan pontokat, amelyeknek nincs adott, akár nagyobb környezetben folytatása.

A mesterséges- és alkalmazási tesztképek alapján, az élgyanús pontok kiemelésére a következő hibrid algoritmust dolgoztam ki:

- Gradiens : diszkrét gradiens operátor képez vektorról skalárra
- NonmaximaSuppression : kiemeli a lokális maximumokat
- Nevatia-Babu : elnyomja azokat, amelyek nem illeszkednek egyenesre

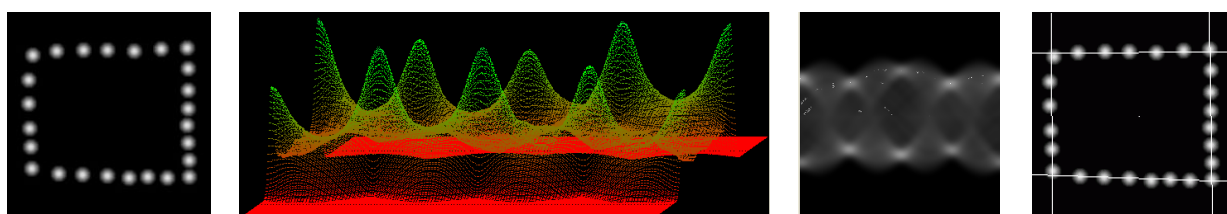
Az eljárás hatékonyságát inhomogén háttérű mintaképen mutatom be a 40. ábrán.



40. ábra: tesztkép, hibrid élkiemelő algoritmusom eredményének axonometrikus- és intenzitás-képe

Az élkiemelés eredménye, a felület jellemzésén túl, csak akkor használható szegmentálásra, ha élkereső algoritmussal összefűzve a szakadásokat folytonos vonalak határolják a tartományokat. A képfeldolgozás ezen része találkozott a mesterséges intelligencia-kutatással, mivel a legtöbb esetben nincs egyértelmű megoldás. Heurisztikus élkereső algoritmusokkal próbálják fogyasztani az esetleges téves vonalakat, folytatni a gyengébben látható, vagy fedettség miatt teljesen hiányzó vonalakat.

Az egyik élkeresésre használt egyik algoritmust, a Hough transzformációt implementáltam. A transzformáció alkalmas egyenes- vagy akár más sík alakzat illesztésére is. A Hough transzformáció egyenes keresése esetén az xy térből reverzibilisen képez le az $r\phi$ 2D térbe, ahol az $I(r,\phi)$ függvény az origótól r távolságra futó, ϕ meredekségű egyenes valószínűségét jelzi. A 2D függvény maximumhelyeinek keresésével meghatározhatók az egyenesek (41. ábra).



41. ábra: xy -kép (a), $r\phi$ Hough-tér axonometrikus- (b) és intenzitás-képe (c), xy -eredmény (d)

A transzformáció érdekessége, más területen történő gyakorlati alkalmazása. A módszer alkalmas diszkrét pontsorozat folytatására, így akár a szántóföldi növények vetés-sorának látórendszeres meghatározására is (Hemming & Rath, 2002, Firtha, 1998). Köröket kereső változatát, a kenyérbél porozitásának jellemzésére használom (Firtha, 2007).

Szegmentálási célokra, a nagy számításigényű, általában adott feladatra fejlesztett speciális élkereső eljárások olyan esetekben is alkalmazhatók, amikor globális módszerekkel nem lehet hatásosan kiválasztani a vizsgált területeket.

5.1.5 Szegmentálási módszerek alkalmazásai

Egyes alkalmazások elsősorban az algoritmusaimat implementáló mérőszoftver képfelvételi, előfeldolgozási módszereit használták kalibrációra, előfeldolgozásra és a képek kötegelt felvételére. Mikroorganizmus telepek számítógépes képfeldolgozással történő vizsgálatakor (42.a. ábra) például Petri-csészékben tenyésztett élesztő-törzseket fényképeztek sötét háttéren, majd a mentett képekből saját Matlab algoritmussal számlálták sikerrel a sejt-telepeket (Török, 2003).

A speciális képfeldolgozó algoritmusokat rutinkönyvtárba (LIB) fejlesztettem, lehetővé téve, hogy a szoftver-fejlesztéshez értő felhasználók saját programjukban eszközként használhassák a függvényeket.

Gabonaszemek szín- és alakjellemezésére készült célalkalmazás (42.b. ábra), képfeldolgozó függvényeim segítségével, a manuálisan beállított szín-iránnyal számolt intenzitás-hisztogrammot, ez alapján választotta ki az objektumokat, a festő-algoritmussal kijelölte az egybefüggő területeket, majd eliminálta a zajnak minősíthető apró foltokat a képen. A kiválasztott tartományokra színtisztítást és az alak leírására szolgáló Fourier együtthatókat mentett az algoritmus. Az adatokat külső statisztikai segédprogrammal és az általam adatelemzési célokra fejlesztett, klaszter-analízist implementáló CLUSTER.EXE szoftverrel elemezte (Baranyai, 1996).

Kultúr- és gyomnövények látórendszer alapján történő szántóföldi pozicionálása és azonosítása (Hemming & Rath, 2002) különösen nehéz feladat. „In vivo” körülmények között, az inhomogén háttéren a levelek egyszerű intenzitás alapján nem különböztethetők meg a háttértől (42.c. ábra), de ebben az esetben is megfelelően szelektál a globális színtisztítka alapján működő algoritmus (Hemming, 1998). Az optimálisan szétválasztó irány meghatározásával definiált intenzitás hisztogramja alapján kiválaszthatók voltak a növények képpontjai, de az inhomogén háttér és megvilágítás miatt fokozott szükség van a festési algoritmuson alapuló zajsűrésre.



42. ábra: Hisztogrammos szelekció alkalmazásainak mintaképei: élesztő, gabona, szántóföld

Az OMMI Zöldség Fajtakísérleti Osztályán paprika-fajták kvantitatív jellemzését is vizsgálják (Farkasné et al., 1999). A paprika látórendszeres osztályozásánál és minősítésénél a szár kiküszöbölése érdekében csak a tanulómintás klaszter-analízis volt használható (43.a. ábra). Adott vizsgált paprikafajta szélsőséges elemein kiválasztva az objektumnak és a háttérnek megfelelő színeket, szín-irányokat, a mintacsoport minden elemét sikeresen ki lehetett választani. Sikeresen alkalmazták a színt és alakot meghatározó algoritmusom paprikafajták leírására (Fehér, 1998).

Csiperkegomba betegségek vizuális paraméterek alapján történő felderítésénél (43.b-c. ábra) szintén a klaszter-analízis algoritmusom (CLUSTER.EXE) nyújtott megfelelő eredményt a felület részeinek osztályozásához. A foltok meghatározása és kvantitatív jellemzése után, a redukált adatokat már a hagyományos statisztikai eljárásokkal lehetett elemezni (Vízhányó, 2000).



43. ábra: Tanulómintás klaszter-szelekció alkalmazásainak mintaképei: paprika (a), gomba (b-c)

Tapasztalataim azt mutatják, hogy bár univerzális kiválasztási módszer nincs, de az eddig előfordult kutatási feladatokhoz, megfelelő háttér és megvilágítás választásával, megfelelő eredményt adtak ismertetett és implementált szegmentációs módszereim.

5.2 Felületjellemezés: szín, lényegkiemelés, mintázat

A vizsgált tartományok kiválasztása után következik azok felületének jellemzése. Munkámban elsősorban a mért RGB jellemzőkkel és az azokból $N^3 \rightarrow R^3$ transzformációkkal nyert származtatott jellemzőkkel foglalkozom. $N^3 \rightarrow R^3$ származtatott jellemzők számításának célja alapvetően kettős lehet:

- vagy valamely szabvány színrendszerhez kívánjuk kötni színmérésünket az összehasonlíthatóság igényével,
- vagy előfeldolgozással valamely, az objektumtípusra informatív jellemzőt kívánunk kiemelni, mint például színezet vagy telítettség.

A felületjellemezés harmadik, speciális módszere a mintázat leírása. Ennek algoritmusai annyira specifikusak, hogy egy fejezetben csak egy mintapéldáját írom le.

5.2.1 Színmérés feltételeinek biztosítása

Szokás az RGB \rightarrow XYZ konverziót, mint egyszerű és adott együtthatójú lineáris transzformációt említeni a szakirodalomban. Ezen források összekeverik a kamera RGB jelét a CIE1931 rendszer jól definiált R'G'B' alap színínger-összetevőivel. Utóbbi összetevőkből a 2.1.3. fejezetben leírt mátrixműveletekkel kaphatjuk az XYZ képzetes színínger-összetevőket. A kamera RGB jele ezzel szemben függ az aktuális beállításoktól is, például attól, hogy mire állítottuk be a fehéregyensúlyt. A megvilágítás spektruma ráadásul olyan hatással lehet a mért jelre, amit még a fehéregyensúly beállításával sem lehet korrigálni.

Univerzális együtthatójú konverzió nem lehetséges. Feltételeztem viszont, hogy meghatározhatók egy adott mérés konvertálásának együtthatói. Ezt indokolja, hogy mind a CIE 1931-es RGB összetevői, mind a színes TV-technika RGB jele az emberi látás szubjektív élményén alapul.

A 4.1.4. fejezetben leírt mérésutasítás betartása elégséges feltételnek bizonyult arra, hogy

- a mérések reprodukálhatóak legyenek
- a lineáris konverzió megvalósulhasson
- a mérés dinamikus munkatartománya megfelelő legyen és
- etalonok mérésével biztosítjuk a konvertálhatóságot

Utóbbi lehetőségnek az ad alapot, hogy az X(R), Y(G) és Z(B) függvények jól közelíthetők voltak lineáris kapcsolattal ($R^2=0.97$ volt).

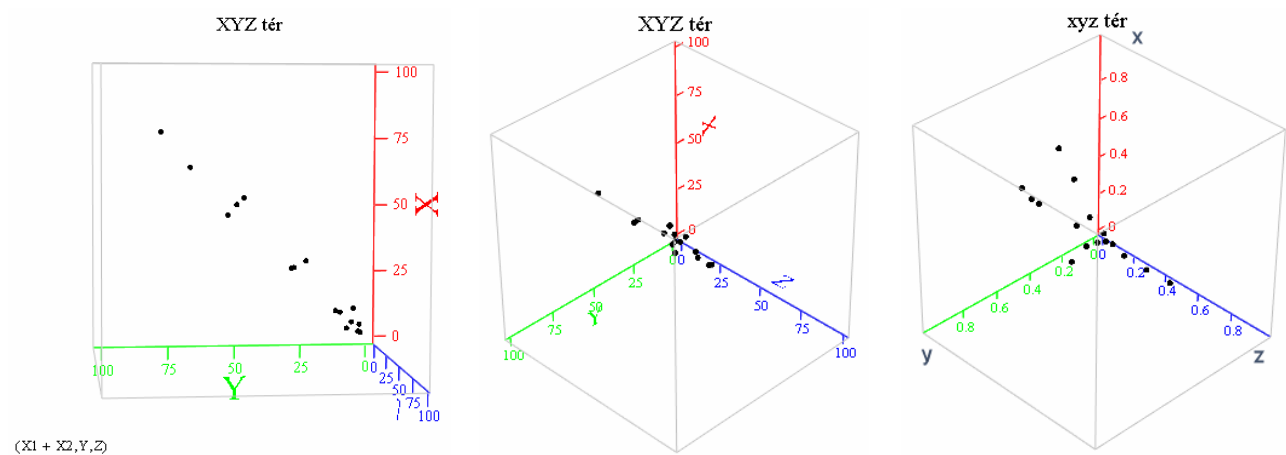
Ugyanekkor a MOMCOLOR etalon korongok ismételt mérései bizonyították, hogy a mért RGB jelek és a korongok XYZ koordinátái közötti egyszerű mátrix-szorzás nem megfelelő hatásokkal közelített. Méréseimet különböző mérésutasítással végeztem, ellenőrizve a koordináták lineáris transzformációinak statisztikai mutatóit. Ez alkalmat adott a mérésutasítás egyes lépéseinek hatásvizsgálatára, de a mátrix-szorzás együtthatóinak automatikus keresése továbbra sem adott tökéletes eredményt.

Mellékelt Excel alkalmazásom bizonyítja, hogy bár a mátrix-együtthatók keresésének statisztikai mutatói egyre jobbak lettek, néhány helyen még mindig sérült a monotonitás és az összefüggés csak az adott mintaanyag, azaz a 16 darab etalon konvertálására alkalmasak. A kiszámolt együtthatók alapján konvertált további RGB minta már rosszabb statisztikai egyezést mutatott a várt XYZ vektorokkal.

Hasonló jelenségnek az lehet az oka, hogy a kalibráláshoz használt 16 etalon korong színe nem feszíti ki megfelelően egyenletesen a színteret. Ezért megvizsgáltam az etalon-korongok ismert XYZ és mért RGB színe koordináták eloszlását. Az okot végül két tényezőben találtam meg:

- A használt etalonok XYZ koordinátái messze nem egyenletesen feszítik ki a teret.
- Még az etalonok normált színvektorai sem alkalmasak bázis-vektoroknak.

Etalonok XYZ vektorainak egyenletessége:



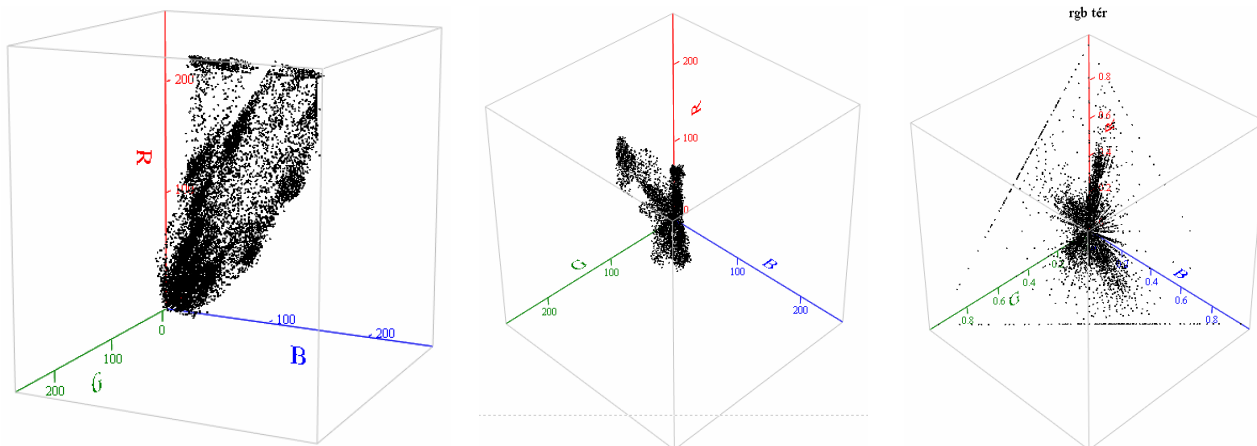
44. ábra: Etalonok XYZ koordinátái két nézetből (a,b), valamint a normált koordináták (c)

A 44. ábra első nézetéből kitűnik, hogy a színvektorok az origó körül nagyobb sűrűségben vannak, de nagy intenzitású vektorokat is megfigyelhetünk.

Az ábra második nézetéből azt láthatjuk, hogy minden pont az X=Y sík mentén helyezkedik el, azaz a piros és zöld komponensek alig különböznek egymástól.

A normált koordináták enyhe szórást mutatnak, meglepően regulárisan, a színtér 4 iránya mentén.

A mért RGB koordináták ennek megfelelően szintén az RGB kocka szűk tartományát foglalják el (45.a-b. ábra), ugyanakkor a normált **rgb** koordináták már egyenletesebben töltik ki az (1,0,0), (0,1,0) és (0,0,1) pontok által meghatározott síkot (45.c. ábra).



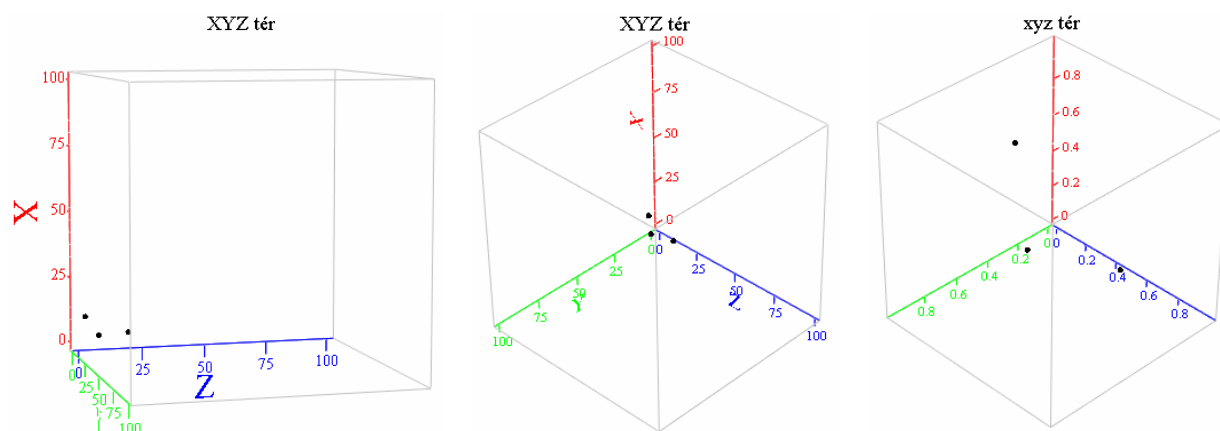
45. ábra: Etalonok mért RGB koordinátái két nézetből (a,b), valamint a normált koordináták (c)

Megjegyzendő, hogy az eredménytérben a várt $R=G$ sík mellett megjelenik egy $G=B$ sík is, valamint, hogy a normált térben is enyhén módosulnak az eredeti xyz térben megfigyelhető irányok. Ennek okát az adott mérésorozat kalibrálásában és a fehéregyensúly beállításában kereshetjük.

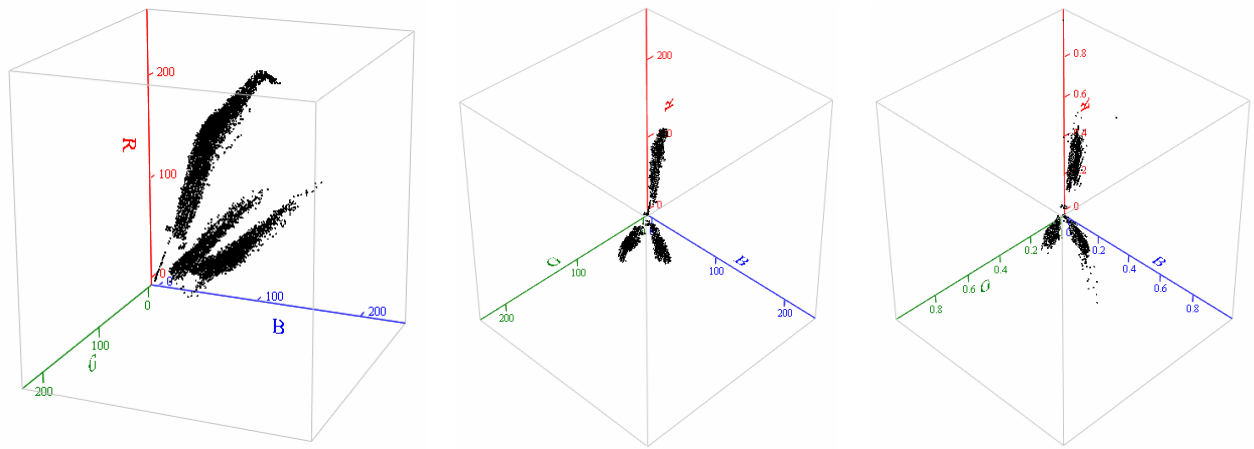
Etalonok intenzitás szerinti szórása:

Előző tapasztalatok alapján megvizsgáltam a 4.1.4. fejezetben, a kalibrálás utolsó lépésében használt 3 etalon korong szórását is.

- A korongok **XYZ** intenzitása a munkatartományhoz képest nagyon alacsony, még normáltjuk sem feszíti ki eléggé az **xyz** háromszöget (46. ábra).
- A mért **RGB** pontfelhők feltűnően elnyújtottak, az intenzitás szórása túl nagy (47. ábra). E tulajdonság nem tűnik fel a kalibráció során, mivel ott nagyobb terület átlagát láthatjuk.



46. ábra: 3 etalon XYZ koordinátái két nézetből (a,b), valamint a normált koordináták (c)



47. ábra: 3 etalon mért RGB koordinátái két nézetből, valamint a normált koordináták

Következtetés:

A mérésutasítás alkalmas a mérés stabilitásának biztosítására, optimális munkatartomány beállítására. Szabvány színrendszerbe való konvertáláshoz olyan etalon felületeket kell választani, amelyek:

- megfelelően kifeszítik az RGB teret,
- megfelelően kifeszítik a normált **rgb** háromszöget,
- intenzitás szerinti szórásuk kicsi.

5.2.2 Térbeli kiterjedés hatásának korrigálása

Az előző fejezet felveti a kérdést, hogy a felület geometriája mennyiben befolyásolja a mérési eredményeket. Legtöbb eddig bemutatott RGB színtér ábrakon megfigyelhető az intenzitás nagy szórása, mégis van egy-két kivétel. A 5.1.1. és 5.1.2 fejezetekben bemutatott alma-képeken, vagy a 5.1.3. fejezetben bemutatott paprika-képen például nem nagy az intenzitás szórása. Az objektum-típusok felülete eltérően viselkedhet.

1. Első kérdés tehát az, hogy az egyes objektumtípusok a szórt fény eloszlása szempontjából, milyen viselkedést mutatnak.
2. Második kérdésként felmerül, hogy a megvilágítás inhomogenitása, az objektum geometriája csak az intenzitást módosítja, vagy hatással van a színírányra is.

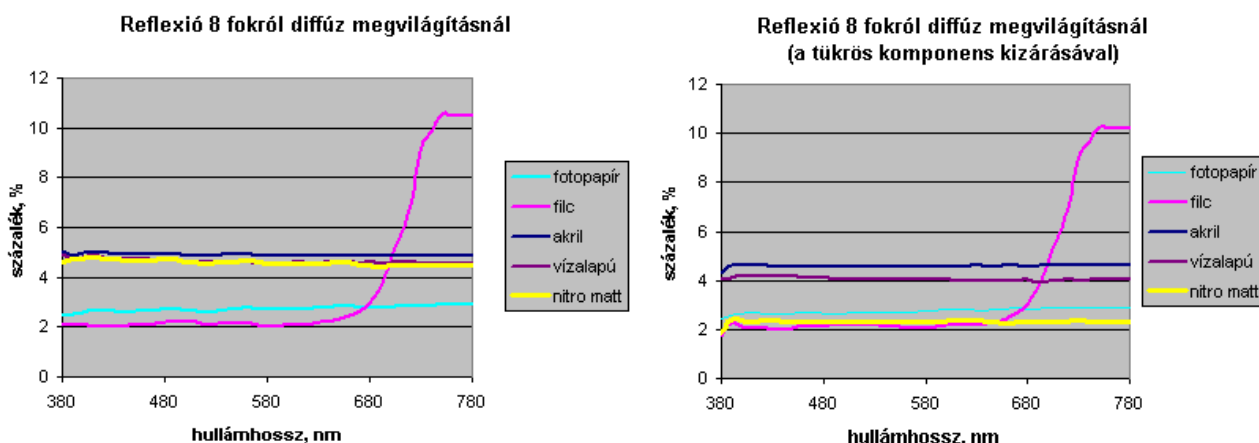
A szórt fény eloszlásának vizsgálatához először izolálni kellett a vizsgálandó objektumot és a kamerát, hogy csak a kívánt irányból érkezzék fény a vizsgált felületre. Erre a célra egy akkora dobozt szerkesztettem, amelynek középebe tett objektumot a dobozba tett kameránk különböző oldalról vizsgálhatja és elegendően nagy ahhoz hogy csökkentsük a nemkívánatos visszaverődés hatását. Kameránk méretei, optikája és a vizsgálandó objektumok mérete alapján a minimális sugár esetünkben 50cm lett. Mivel az így adódó 100cm*100cm*50cm méretnél nagyobb eszköz elhelyezése, tárolása is gondot okozna, a méretet ekkorára választottam (48. ábra).



48. ábra: Doboz, interface, vetítő

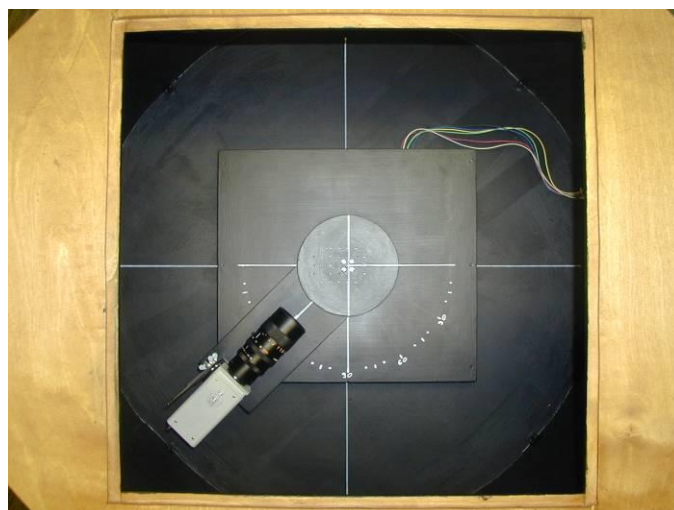
Írásvetítőt használtam fényforrásként (Carena autofocus 5005). Készülékünk szabályozott hőmérsékletű halogén izzója és kiváló optikája megfelelő és méréseim szerint időben állandó spektrumot szolgáltatott. Az optikát megfelelő pozícióba állítva és a blendét megfelelően szűkítve a fénysugarak párhuzamosnak tekinthetők. A blende cserélhető, hiszen megfelelő alakja és mérete függ a mért objektum paramétereitől.

A doboz belső felületének optimális fedéséhez több fekete festéktípus reflexióját mértem UltraScan spektrofotométerrel.



49. ábra Különböző fekete festékek reflexiós spektruma diffúz és direkt megvilágítás esetére

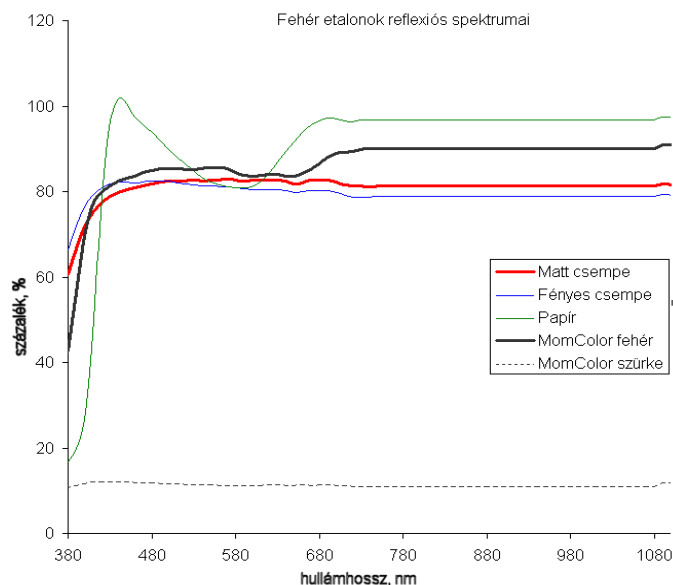
A 49. ábra szerint ugyan a fotópapír bizonyult mindkét esetre a legjobbnak, de azzal, sérülékenysége miatt nem lehetett az eszközt beborítani. A mozgó, nagyobb kopásállóságot igénylő alkatrészekre a matt nitro festéket, egyéb felfületekre pedig víz alapú fekete festéket választottam. Ezen típusokra a reflexió kicsi, visszaverődési-szög szerinti eloszlása homogén, a direkt tükröződés szintén kicsi. A festékek hatásos abszorpcióját bizonyítja, hogy bár a következő kép szemből, vakuval készült, a tükröződés elhanyagolható (50. ábra).



50. ábra: Fekete doboz szemből, vakuval fényképezve

A mérés reprodukálhatóságát és megbízhatóságát a 4.1.4. fejezetben ismertetett módon biztosítottam. Különböző fényforrások, mint UV lámpa, hagyományos izzó, halogén lámpa spektrumát ellenőriztem.

A fehéregyensúly beállításához használandó lehetséges fehér felületek spektrumát szintén lemértem: etalonokat és kereskedelemben kapható fehér papírokat, csempéket. Méréseim eredményét illusztrálja az 51. ábra.



51. ábra: Matt fehér csempe (piros) és MOMCOLOR etalon (fekete) reflexiója

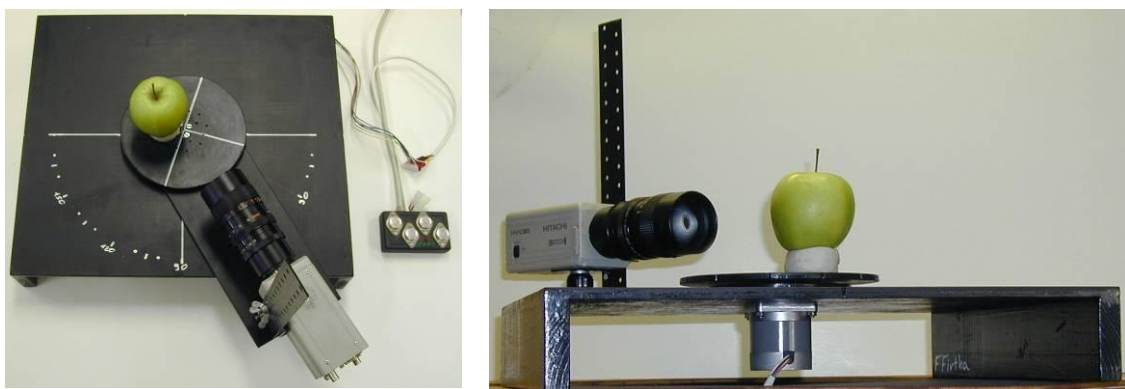
Méréseim szerint adott típusú matt fehér csempe reflexiós spektruma homogénebbnek bizonyult, mint a MOMCOLOR színmérő berendezéshez mellékelt fehér etalon. A csempe mérete alkalmas a feladatra (minimum 12*9cm), alacsony beszerzési ára miatt a hallgatói méréseknél is javasolom használatát.

Fent vázolt méréselrendezéssel (az objektum és a kamera izolálásával, a visszavert fény kiküszöbölésével, a kamera helyes beállításával (pl. fehéregyensúly) és párhuzamos fény-nyalábbal történő megvilágítással) a csillagászati fényképeken megszokott élességgel láthatjuk az objektum kontrasztját, az intenzitás függését a geometriától (52. ábra).



52. ábra: Száradó alma

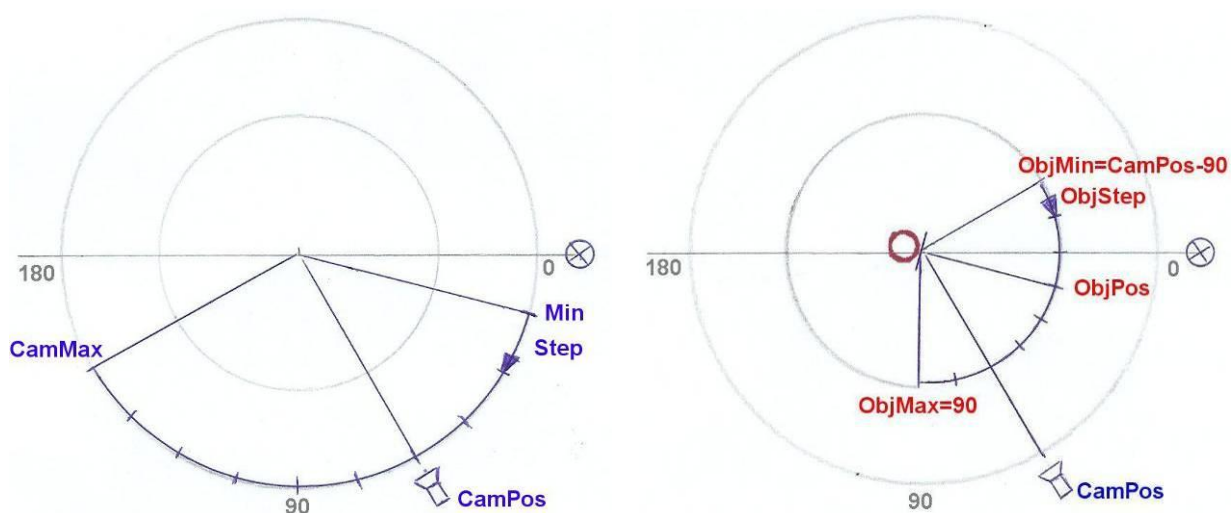
A vizsgált felületdarabot forgó zsámoly középpontjába állítva, a zsámolyt számítógép vezérelte léptetőmotorral forgatva állítom be a mérni kívánt beesési szöget (53. ábra). A léptetőmotor LPT porton keresztüli vezérlését, hardver és szoftver illesztését saját eszközzel oldottam meg. A reflexió mérésére fejlesztett célszoftverem 0,9 fok pontossággal tudja beállítani a beesési szöget az alkalmazott léptetőmotor-típussal.



53. ábra: Kamera és forgózsámoly pozicionálása

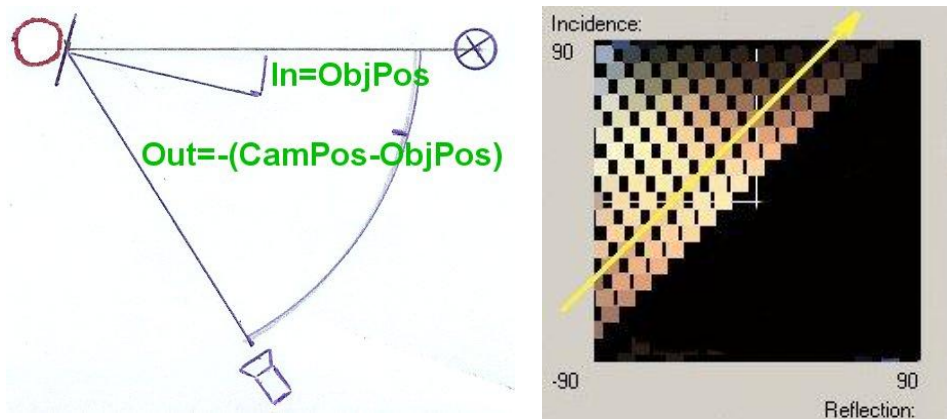
A kamera pozíciója határozza meg, hogy a léptetőmotorral beállított beesési szöghöz mekkora visszaverődési szög tartozik. A kamera pozícióját manuálisan, 15 foktól 150 fokig, 15 fokként állítottam. 150 fok fölött nem mértem, ugyanis 150 fok fölött, a 180 fokhoz közeledve az optika egyre erősebb kékés elszíneződést érzékel.

A kamera pozicionálása után a szoftver az alanti ábra alapján számítja ki, hogy a forgózsámolyt mekkora minimális szögtől, mekkora maximális szögig pozicionálja meghatározott felbontással a méréssorozat alatt (54. ábra). A forgózsámoly irányát a felület normálisával jellemzem.



54. ábra: Kamera pozíciójának beállítása, majd a forgózsámoly forgatásának paramétereit

Adott kameraállás és forgószámoly-pozíciónál felvett kép beesési- ("In") és visszaverődési szöge ("Out") az alanti ábra alapján kiszámítható (55.a. ábra). A jobb oldali ábrán sárga nyíllal jelöltem az adott kameraállásnál felvett képsorozat átlagszínét (55.b. ábra). Feltételezve, hogy a vizsgált felület színszórása szimmetrikus, az eredmény tükrözhető az átlóra.

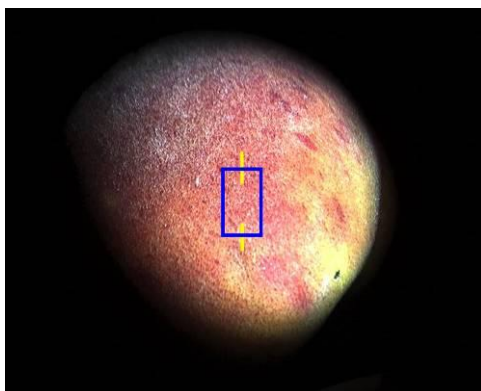


55. ábra: Méréselrendezés (a). Dió reflexiója a beesési és visszaverődési szög függvényében (mérőszoftver képernyőképe) (b)

A célszoftver feladata a méréssorozat vezérlésén túl, a statisztika alapjául szolgáló tartomány kiválasztása (56. ábra), majd a tartomány színének statisztikai elemzése és az eredmény mentése. A képtér közepét, azaz a kamera optimális irányát (sárga) 90 fokos visszaverődési szögű, tehát az oldalról nézett felületre manuálisan állítható be, majd a képek vizsgálandó tartományát (kék téglalap) manuálisan, egér segítségével lehet kijelölni.

Ugyanakkor a tartomány szélessége, ahol megbízhatóan az irányra jellemző reflexiót mérünk, monoton csökkenve függ az aktuális visszaverődési szögtől. A tartomány szélességének szűkítését az algoritmus automatikusan számolja a szögből a forgószámoly mozgata során. A vizsgált tartománynak oldalnézet esetén akár a fele is a háttérhez tartozik. A szűkített képtérből ezután a háttérret képfeldolgozási művelet zárja ki hisztogram alapján.

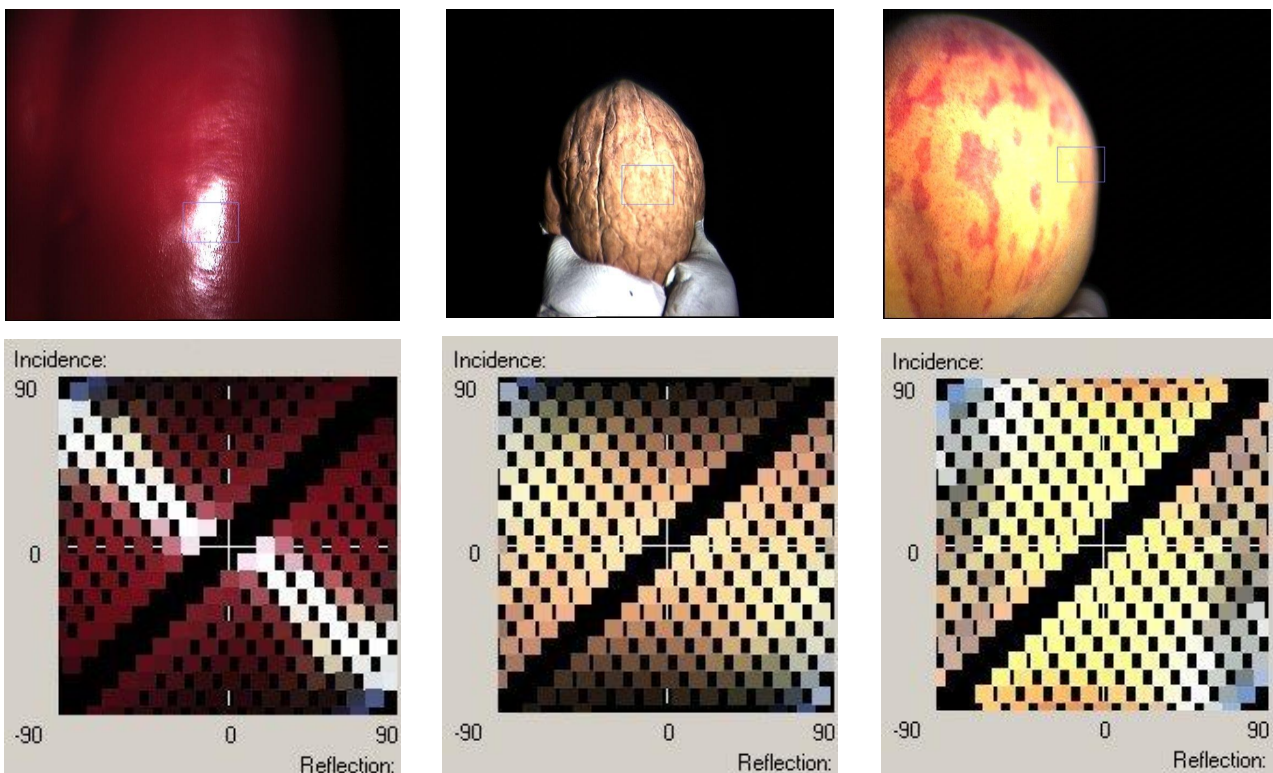
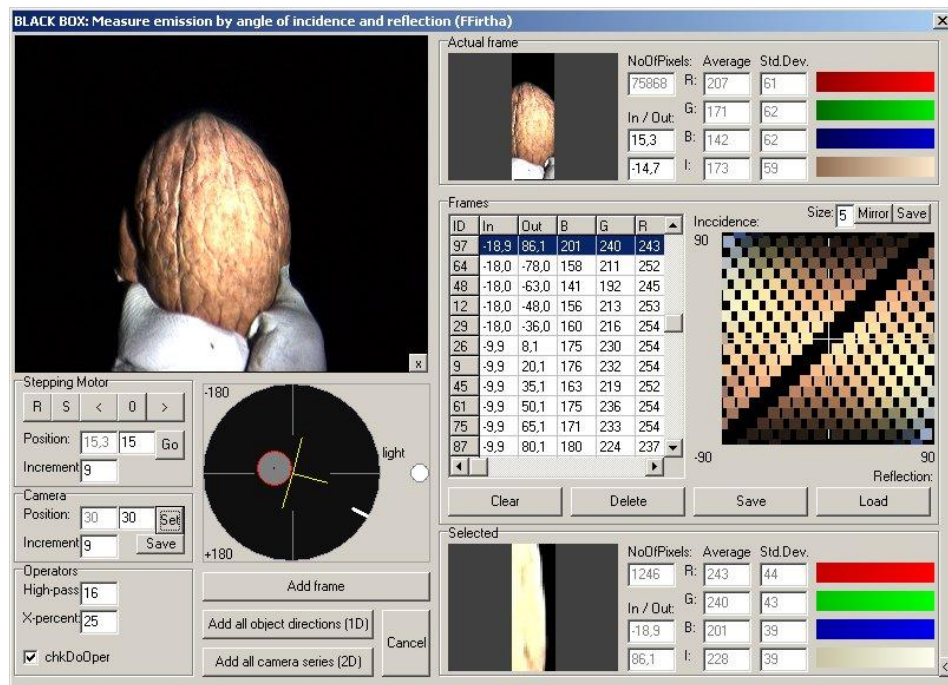
Az így kiválasztott tartományra készül statisztika (RGB átlag, szórás és korreláció), amelyet a Reflexió(beesési szög, visszaverődési szög) mátrix egy adatként ment.



56. ábra: Vizsgálandó tartomány kiválasztása

A mérési módszerrel terménytípusok jellemzően különböző viselkedésformáit mértem (57. ábra). Egyes terménytípusok, mint a paprika, a G és B komponenseket egyenletesen szórják, de az R-et tükrözik. Egyes típusok reflexiója független a beesési szögtől (őszibarack), másik típus reflexiója pedig a visszaverődési szögtől független (dió).

A mért RGB szín függése a geometriai kiterjedéstől és inhomogén megvilágítástól tehát modellezhető, figyelembe véve az objektumtípus mért viselkedését.

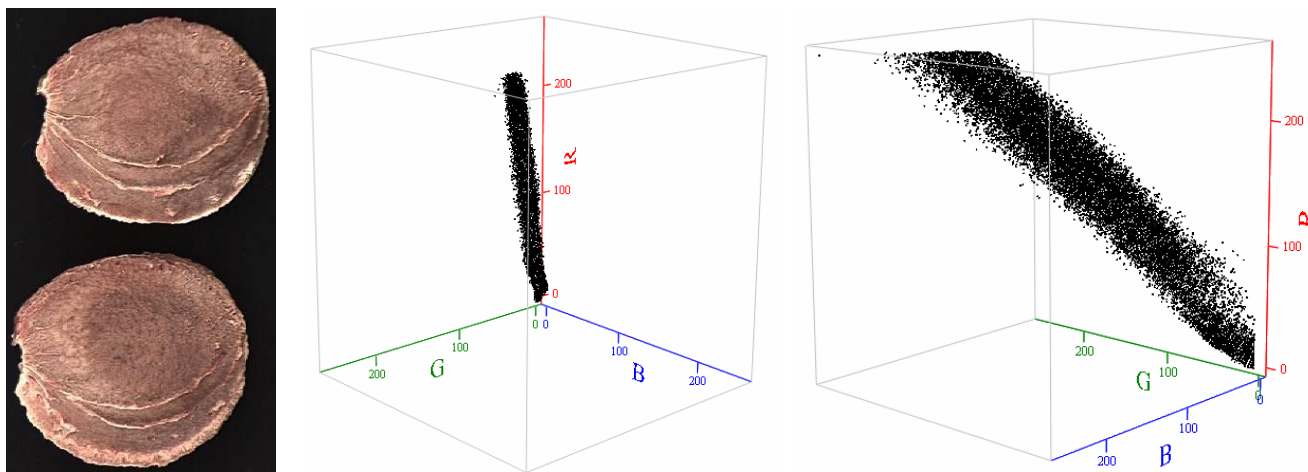


57. ábra: Vezérlő szoftver képernyőképe és különböző termények (paprika, dió, őszibarack) reflexió tulajdonságai

5.2.3 Lényegkiemelés, statisztika

Az $N^3 \rightarrow R^3$ kölcsönösen egyértelmű konverzió másik jellemző célja, a vizsgált sajátságok real-time kiemelése, hogy a későbbi statisztika már a konvertált paraméterekre készülhessen el. A képfeldolgozásban gyakran használt Hue-Saturation-Value rendszerek (HSV / HSI) **színezet** koordinátája például jól kiemeli egyes gyümölcsök színének éréstől függő változását. Miközben egy gyümölcs színe a zöldből sárgára, majd pirosra vált, jellemzően a színezet szöge változik

Az **intenzitás** (value) sok esetben a megvilágítás és a geometria okozta inhomogenitást fejezi ki, így célszerű külön koordinátaként leválasztani. A mintaképen (Herman et al., 2005) a barackmag színvektorai meglepően szorosan illeszkednek egy egyeneshez, bár a piros koordináta szórása nagyobb (58. ábra). A pontfelhő azt illusztrálja, hogy amíg a színirány egyes terményeknél jól meghatározott, a felület egyenetlen megvilágítása és ebben az esetben vélhetően az anyag inhomogén nedvességtartalma miatt az intenzitás szórása jellemzően nagy. Az intenzitás információtartalma adott esetben kicsiny lehet.



58. ábra: Barackmag (a) pontjainak színe az RGB térben két nézetből (b,c)

Az intenzitástól független **normált szín** 2 koordinátával jellemezhető. Mivel a terményeknél leggyakrabban a zöld és piros szín fordul elő, általában a normált zöld és piros koordinátákat célszerű használni. Zöld tartományban legérzékenyebb az emberi szem és egyes érő gyümölcsök

fekete -> zöld -> sárga -> piros -> fekete

átmenete felfogható, mint a zöld, majd késleltetve a piros komponens idő szerinti haranggörbéinek szuperpozíciója.

Fenti barackmag ábrája kérdéseket vet fel a színirány jellemzésével kapcsolatban. A színek jellemzően egy egyenes mentén helyezkednek el. Szórásuk ugyanakkor egyenletes, független az intenzitástól. Ez azt okozza, hogy a normált piros-zöld koordináták szórása a kis intenzitású képpontok esetén rendkívül nagy. Így hasonló objektum-típus, pl. dohánylevelek (lásd 4.1.4. fejezet) színirányának meghatározásához az átlagszín számítása helyett javaslom jellemző egyenes illesztését az egész sokaságra.

Az illesztett egyenes nem megy át az origón, aminek oka a fehéregyensúly beállításában kereshető.

A megfelelő szabvány- vagy lényegkiemelő színrendszerbe történő konvertálás után megtörténhet a színstatisztika készítése. Algoritmusom számítja a teljes képre és a megtalált objektumokra is, az RGB- vagy az előfeldolgozással nyert koordináták

- átlagát, szórását és
- kovariancia-mátrixot

Az eredményt a statisztika kimeneti állományának soraként jegyzi be. Ezen sor tartalmazza még az

- objektum sorszámát,
- a pixelek számát és
- a felület súlypontját (x,y), és az 5.3.1. fejezetben leírt polár-koordinátás körvonal súlypontját is.

A fejlesztett mérőszoftver a kép-fájl nevével megegyező, de kiterjesztésében és helyében különböző további kimeneti állományokat hoz a képek kötegelte feldolgozása során:

Kiterjesztés: STA: terület- és szín-statisztika a képen megtalált objektumokra

BMP: megtalált objektumok fekete háttéren (ellenőrzéshez)

OUT: körvonalak pontjainak x,y koordinátái (export)

F00: körvonalak pontjainak polár koordinátái (export)

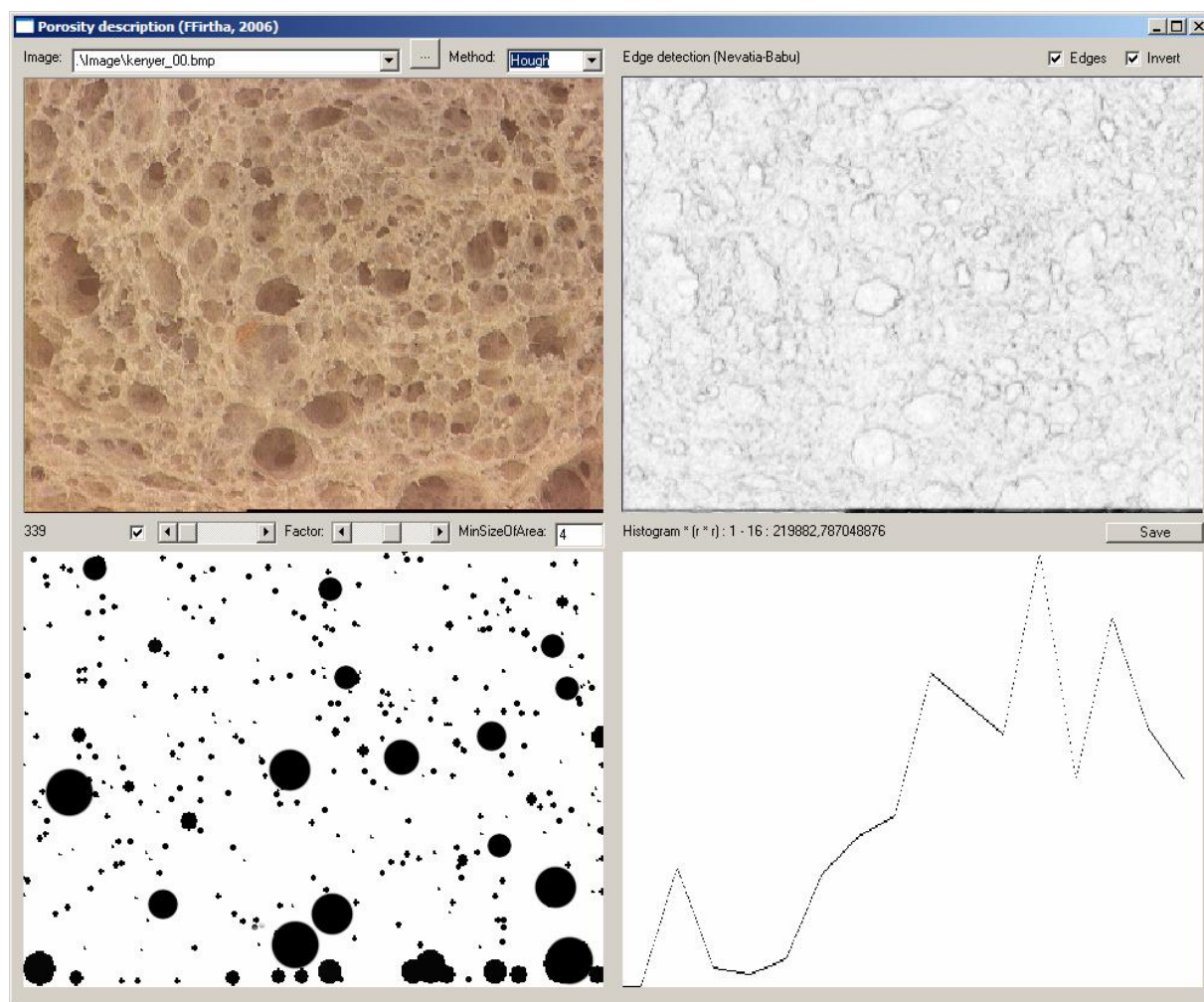
FFT: Fourier-transzformáció együtthatói (alakleírás)

A mérés-sorozatonként sok megabájtnyi képadatot így az algoritmus alig pár, a színt és az alakot leíró paraméterre redukálja. A mentett paramétereket azután később statisztikai programmal lehet elemezni.

5.2.4 Mintázat speciális jellemzése

Felület mintázatának, színtől vagy más előfeldolgozott koordinátáktól független speciális jellemzésének mintapéldája a kenyér porozitásának vizuális paraméterek alapján történő leírására fejlesztett algoritmusom. Módszerem a porozitást nem egyetlen mérőszámmal, hanem a buborékok becsült méretének eloszlásával, azaz hisztogrammal kívánja jellemezni. A jelenleg is aktív kutatási feladatra három alternatív módszert fejlesztettem és implementáltam:

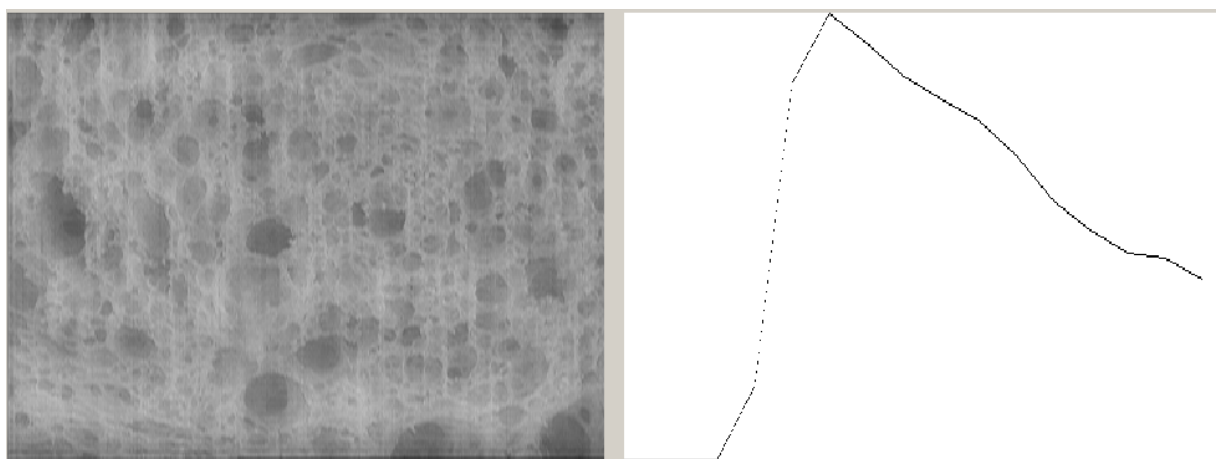
1. A Hough transzformáció megfelelő implementációja nem csak egyenest, de adott sugarú kör valószínűségét is keresheti. Algoritmusom az RGB kép szürkére konvertálása és éldetektálás (Nevatia-Babu hibrid) után, egy (x,y,r) adatkockában (Hough tér) leírja az adott (x,y) pont köré írt r sugarú kör valószínűségét. A fejlesztett szoftver megjeleníti a Hough tér adott r -állandó metszetét, a síkokon a lebegőpontos valószínűségeket átlagolva számítja a sugár hisztogramját (59.d. ábra), sőt megjeleníti az N darab legnagyobb valószínűséggel megtalált kört (59.c. ábra). E módszerem leírja az általában ellipszoid fél-buborékok alakját is, de a maximális keresett sugártól négyzetesen függő futási ideje a következőkben ismertetettekénél lényegesen hosszabb.



59. ábra: Eredeti kép (a), élkeresés (b), detektált körök (c), hisztogram (d)

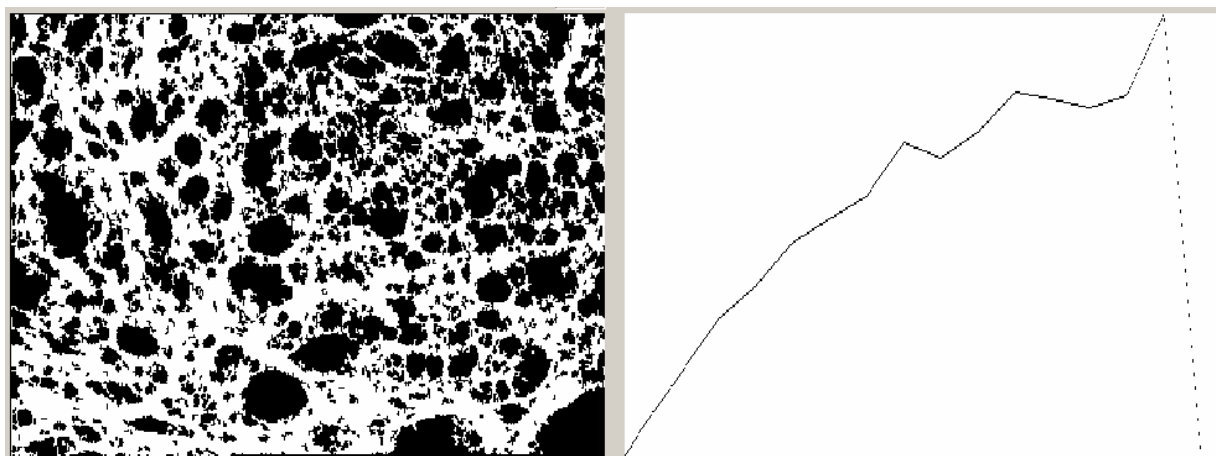
A 2D Fourier transzformáció alapján leíró módszerem lényegesen rövidebb futásidővel dolgozik. Az algoritmus a képméretet mindkét koordinátára 2^n hatvány felbontásúra igazítja, ablakfüggvénnyel küszöböli ki az önkényesen választott határok torzító hatását, a 2D FFT algoritmus eredményéből kiszámítja az egyes frekvenciák amplitúdóját, majd ez alapján számítja a sugár hisztogramját (60.b. ábra).

A Fourier transzformáció adatredukciós lehetőségét illusztrálja az 60. a. ábra. A Fourier térben adott számú alacsonyabb frekvencia együtthatóit meghagyva, a magasabb frekvenciákat nullázva, inverz transzformációval rekonstruálhatjuk a képet. Az ábrán a 392×274 pixel felbontású mintakép mindössze 10×10 együtthatóból rekonstruált képe látható.



60. ábra: Inverz FFT-vel 10×10 skalárból rekonstruált kép (a). Sugár hisztogramja (b)

Harmadik módszerem a szürke-konverzió után az intenzitás mediánját használja a szegmentáció küszöbértékeként. Ezzel próbálom kiküszöbölni a változó erősségű megvilágítás hatását az eredményre. Második lépésben a szegmentációt festő-algoritmus korigálja egy választott minimális pixelszám alapján, beolvastva a túl kicsiny szigeteket. A terület-értékek gyökéből számított hisztogrammal szintén becsülhető a sugár szerinti eloszlás (61. ábra).



61. ábra: Szegmentálás eredménye medián küszöbvel és zaj-korrekcióval (a) és a mintaképre számított sugár-hisztogram (b)

A bemutatott algoritmusok hatékonyságának összehasonlítása jelenleg is folyamatban van (Noguláné et al., 2008). Az eredményeket összehasonlítva a szabványban meghatározott mérés eredményével, mindhárom vizuális módszer ígéretesnek bizonyul a porozitás leírására, természetesen különböző futási idővel és teljesítménnyel.

A mintapélda rámutat, hogy a mintázat leírására már csak speciális algoritmusok alkalmazhatók.

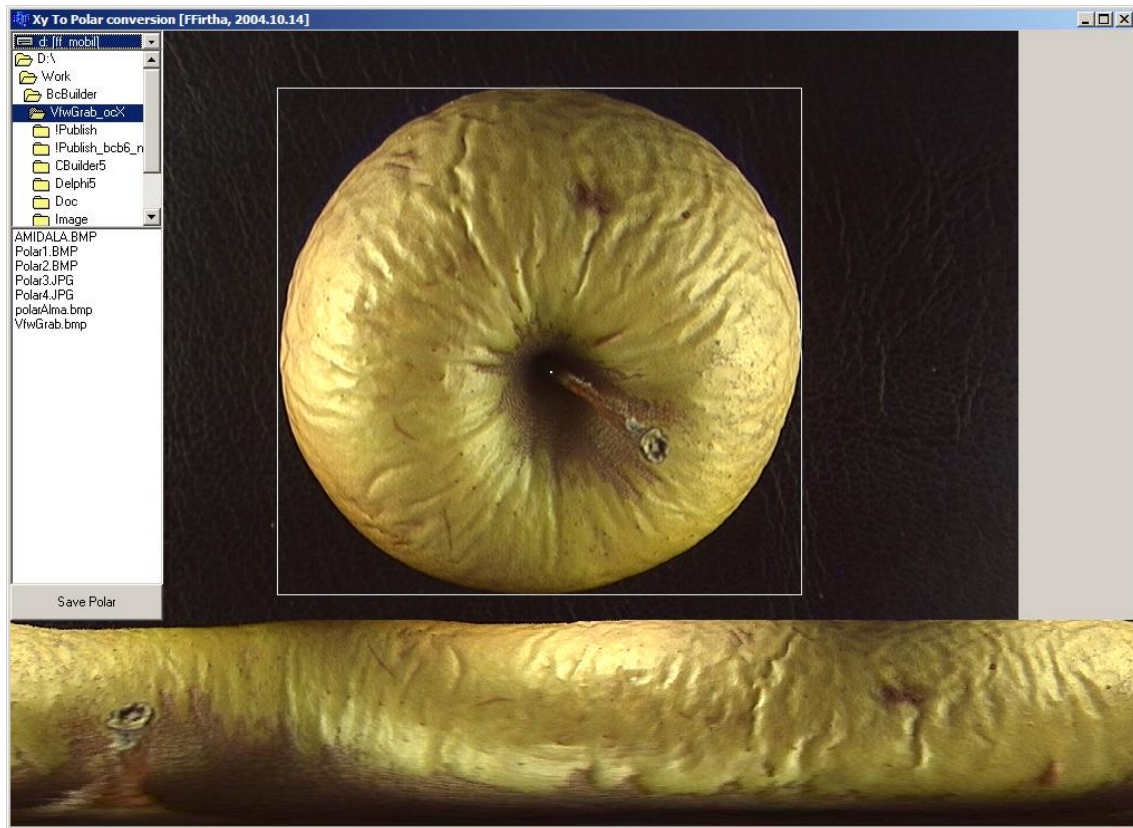
5.2.5 Felületjellemezés alkalmazása élelmiszerek minősítésére

A színmérés egyik alkalmazásánál fermentálódó dohánylevelek szín-változását mértük (Szedljak, 2005) (62. ábra). Az inhomogén megvilágítás miatt vált különösen fontossá a kalibráció mérésutasításának kidolgozása, a pixelzaj algoritmikus csökkentése (lásd. 4.1.4. és 5.2.1.), valamint a mért jel beesési és visszaverődési szögtől való függésének ismerete (lásd. 5.2.2.). Algoritmusom segítségével 22 héten keresztül sikerült a mérés stabilitását biztosítani. A szín-etalonok átlagosan 85,73 intenzitáshoz képest, a koordináták etalonon belüli szórása elfogadható volt (RGB: 3,60 – 2,89 – 3,25).



62. ábra: Fermentálódó dohánylevelek mintakép

A mintázat-jellemezés egyik alkalmazása volt, tárolt alma száradásának vizuális jellemzése (Olasz, 2004). A szín változása és a beteg felületek érzékelése mellett, megfelelő eljárással a felület ráncosodása is mérhető. Algoritmusom számította a szín RGB koordinátáinak átlagát és szórását. A feladatra fejlesztett célalgoritmusom a középpont és a befoglaló téglalap kiválasztását teszi lehetővé, majd a felületet az excentrikus polár koordinátarendszerben jeleníti meg (63. ábra: Polar.exe) és menti későbbi statisztikai analízisre.



63. ábra: Alma felületi egyenetlenségének detektálására fejlesztett szoftver képernyőképe

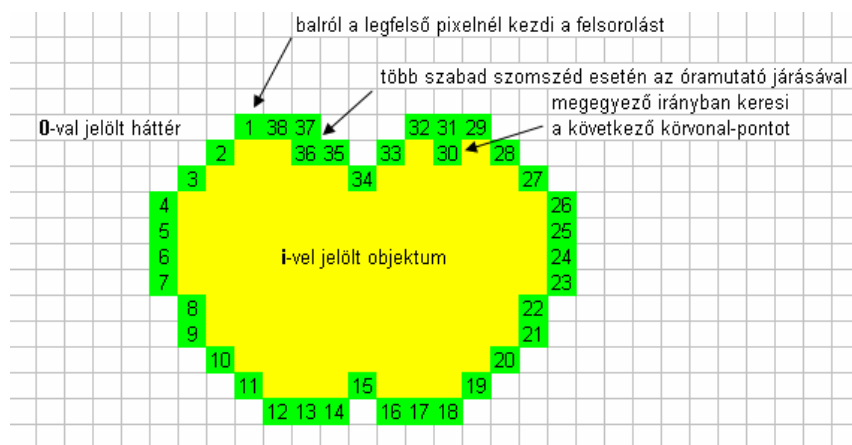
A mért RGB jel, megfelelő méréseljárással konvertálható standard színrendszerbe. Színmérés esetén, a vizsgált objektumtípus geometriájának torzító hatása mérhető és korrigálható. Vizsgált tulajdonságot kiemelő színrendszerbe előfeldolgozással, valós időben konvertálható a mért RGB jel. Ugyanakkor a mintázat speciális jellemzésére célspecifikus algoritmus fejlesztendő.

5.3 Alak leírása

Az alak jellemzésének alkalmazástól függően számtalan megközelítése lehet. A gyakorlati megvalósítások általában rendkívül egyediek, hiszen költségkímélő megoldásokat és általában nagy sebességet igényelnek. Sok célalkalmazásban például az alakot alig pár méréspont alapján becslik. Az irodalmi áttekintés fejezetben említett üvegviszaváltó automata például csak pár jellemző pontban mér vonalkamerák segítségével magasságot, vállmagasságot, szélességet. Autógyár csavarmenetet ellenőrző látórendszere a képtérből szintén csak egy adott vastagságú, a menetemelkedésre merőleges vonal ablak adatait dolgozza fel, hiszen csak az adatmennyiség csökkentésével és hardveres redukcióval képesek egy tizedes perc alatt osztályozni. Alakleírás alatt a továbbiakban általánosabb, az objektum 2 dimenziós síkvetületének körvonalát leíró feladatot értek.

Gyakorlati alkalmazásoknál másrészt általában nem cél az eredmény értelmezhetősége sem, ha az algoritmus egyébként működik. Az osztályozási feladatot ellátó mesterséges neuronháló (FFirtha, 1996) például "fekete-doboz"-ként úgy redukálja az adatokat, hogy nem feltétlenül tudjuk értelmezni a kimeneti rétegen nyert értékeket. A fejezetben ezzel szemben olyan adatredukciós módszereket mutatok be, amelyek eredménye vagy az adott objektumtípusnál értelmezhető vagy az alak lényegi sajátosságát írja le.

Az alak leírásának első feladata a kiválasztott objektumok körvonal-pontjainak felsorolása. Algoritmusom az összes 1-től 255-ig sorszámozott kiválasztott objektumra, annak bal-felső pixelétől kezdve, az óramutató járásával ellentétes, tehát pozitív irányban járja körül az objektumot. A következő szabad, tehát még fel nem sorolt körvonal-pontot mindig az óramutató járásával megegyező irányban keresi (64. ábra). Az így felsorolt pontok $x(t)$ és $y(t)$ koordinátáit közelítem a további fejezetekben interpolációs és approximációs eljárásokkal (Gisbert and Galina, 1993).



64. ábra: Mintaobjektum körüljárásának algoritmusja

5.3.1 Leírás Fourier transzformációval

A $[0, T]$ tartományon korlátos, integrálható és legalább szakaszonként differenciálható függvény Fourier sora a függvényt alap- és felharmonikus függvényekkel közelíti a következőképpen:

$$f(t) = c_0 + \sum_{i=1}^{\infty} a_i \cdot \cos(2p \cdot i \cdot \frac{t}{T}) + b_i \cdot \sin(2p \cdot i \cdot \frac{t}{T}) \quad (14)$$

$$c_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt \quad a_i = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(2p \cdot i \cdot \frac{t}{T}) dt \quad b_i = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin(2p \cdot i \cdot \frac{t}{T}) dt$$

A diszkrét Fourier transzformáció (DFT) az $f(t)$ függvény N darab diszkrét és ekvidisztans alappontban ismert értéke alapján számolja ki a függvény közelítését $N/2$ harmonikus komponenssel. A gyakorlati igényeket kielégítő sebességű, gyors Fourier transzformáció (továbbiakban FFT) kettő hatvány alapponttal számol (Székely, 1994).

Fourier transzformációt elsődlegesen, konvex objektumok alakjának leírására használtam.

- Az algoritmus az $\mathbf{x}(t)$ és $\mathbf{y}(t)$ körvonal-vektorokból számítja a körvonal súlyponthoz (felület-középpont) viszonyított polár-koordinátás vektorát, pontosabban a súlypontból, az alakzaton belül húzható húrok által alkotott alakzat polár-koordinátás körvonalát.
- Az $\mathbf{r}(t)$ és $\varphi(t)$ adatvektorok alapján, a $0..2*\pi$ tartomány FFT által megkövetelt 2^n darab ekvidisztans pontjában kiszámítja $\mathbf{r}(t)$ értékét lineáris interpolációval. A 2^n osztáspontok számát a felhasználó a felületen állíthatja be. Kiszámú körvonal-pont esetén használható más interpolációs vagy regressziós eljárás is.
- Fourier transzformáció számítja ki a polár-koordinátás körvonal közelítését 2^{n-1} komplex harmonikus komponenssel (plusz konstans).
- Az FFT komplex eredményéből, azaz a $\cos(x)$ és $\sin(x)$ tagok a_i valós és b_i képzetes szorzótényezőiből számítja az amplitúdó-eltolás reprezentáció paramétereit. Az ismert trigonometriai azonosságot feladatunkra implementálva:

$$\sin(a + b) = \sin(a) \cdot \cos(b) + \cos(a) \cdot \sin(b) \quad (15)$$

$$c \cdot \sin(x + j) = c \cdot \sin(j) \cdot \cos(x) + c \cdot \cos(j) \cdot \sin(x)$$

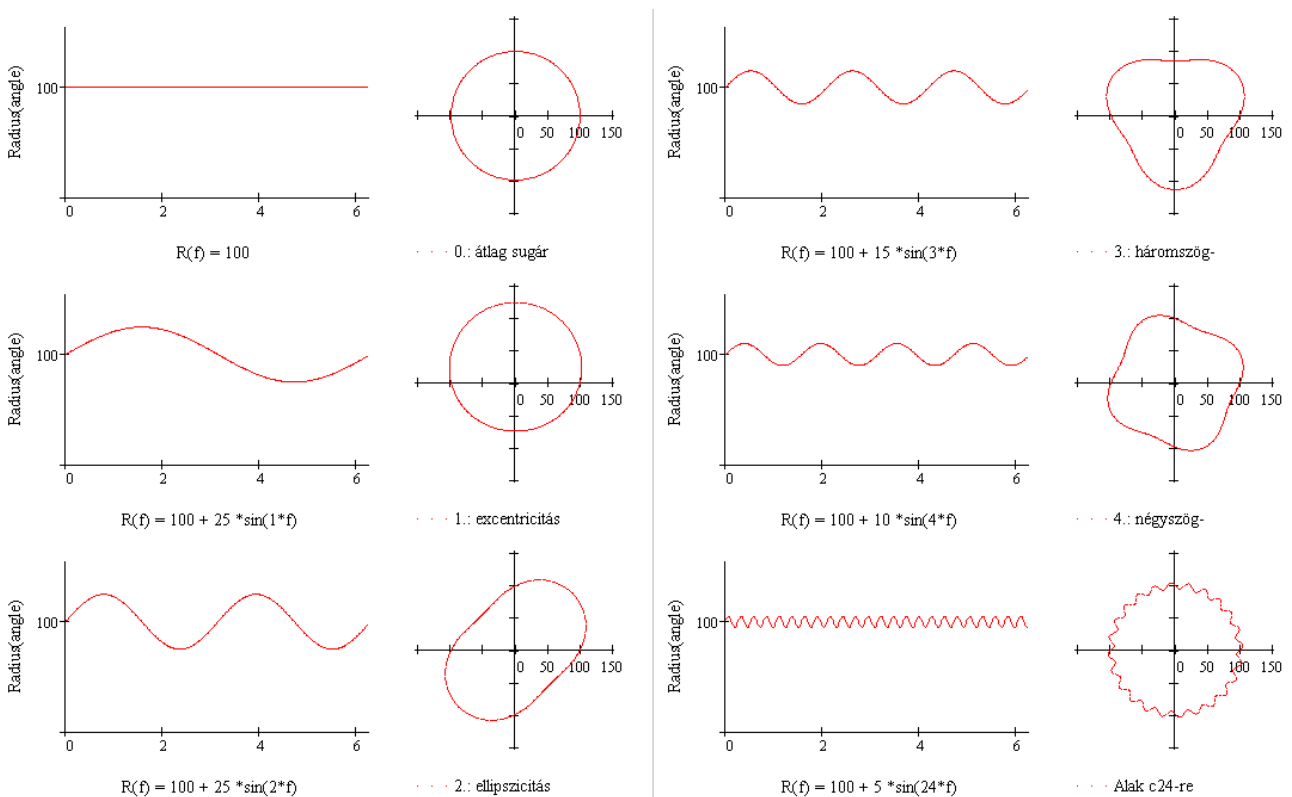
Az amplitúdó-eltolás reprezentáció:

$$f(t) = c_0 + \sum_{i=1}^{\infty} c_i \cdot \sin(2p \cdot i \cdot \frac{t}{T} + j_i) \quad (16)$$

$$c_i = \sqrt{a_i^2 + b_i^2} \quad j_i = \arctg(a_i / b_i)$$

Így megkaptuk az alakzat polár-koordinátás körvonalának közelítésére az egyes felharmonikusok amplitúdóját és eltolását. Következő ábrán illusztrálom, hogy ezen paramétereknek milyen szemléletes jelentést adhatunk (65. ábra):

- 0. amplitúdó (constans) határozza meg az átlagos sugarat
- 1. amplitúdó (alapharmonikus) abban az esetben nagy, ha a körvonal excentrikus, azaz az alakzat súlypontja (felület-középpontja) nem egyezik meg az a körvonal pontjainak súlypontjával
- 2. amplitúdó (felharmonikus) az ellipszicitást, az eltolás pedig az alakzat nagytengelyének irányát határozza meg. A nagytengely hossza első közelítésben a $2*(c_0+c_2)$ összefüggéssel becsülhető
- n. amplitúdó meghatározza az alakzat n-szög-szerűségét, szimmetriáját.



65. ábra: Polár körvonal Fourier együtthatók szemléltetése különböző c_i értékekre

A módszer alkalmas konvex objektumok szimmetriáinak felderítésére, amennyiben ezen n-ed hullámhosszú részletek periodikusak és harmonikusak. Ha az ismétlődő részletek hullámhossza nem teljesen azonos, úgy az FFT eredményben megjelenő csúcs várhatóan szélesebb lesz. Ha az ismétlődő részletek jellege nem harmonikus, úgy várhatóan a hullámhossz által meghatározott frekvencia felharmonikusai is megjelennek.

Itt kell megjegyezni, hogy a 2. komponens együtthatóinak használatára, tehát a nagytengely irányának és hosszának meghatározására, a felület összes pontjára készített 2-változós statisztika megfelelőbb és kevésbé számításigényes lehetőséget nyújt.

A Fourier transzformáció egyéb alkalmazásait az illető fejezetekben írom le.

5.3.2 Periodikus részletek leírása

Természetes objektumok részletei sok esetben periodikusak. Ennek egyik legismertebb példája az egyes levéltípusok szélén megfigyelhető fogazat. Ezek megfelelő leírása segíthet a levéltípusok osztályozásában. Német szántóföldi alkalmazás vizsgálta az osztályozás lehetőségeit (Hemming 1998). A traktor által vontatott felépítményre a leírt esetben 120 centiméterenként, 1 méter magasságban szerelt kamerák pásztázták a sort. A sor felismerése a levelek 5.1.2. fejezetben leírt szegmentálása és a kultúrnövény megkülönböztetése után, a 5.1.4 fejezetben leírt Hough-transzformáció alapján történt. A sorok felismerése alapján történt a traktor kormányának vezérlése.

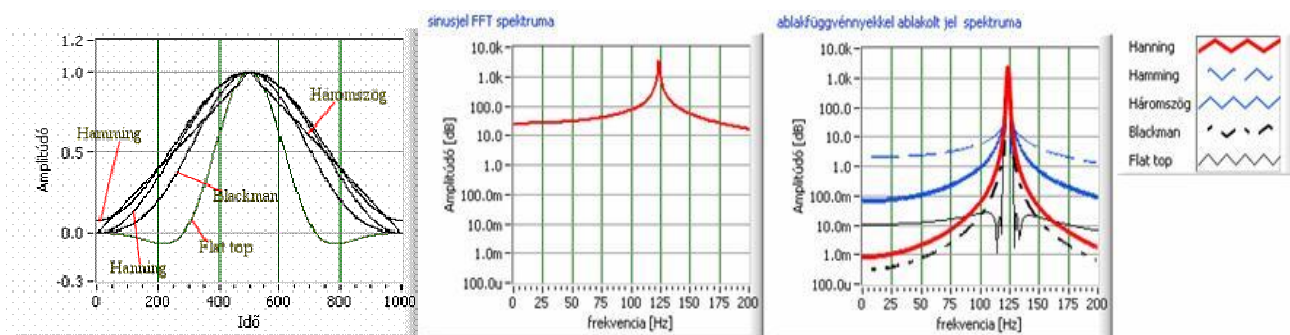


66. ábra: Kultúr- és gyomnövények képe különböző fejlettségi állapotban

Az algoritmus fő feladata a kultúrnövény (káposzta) és gyomnövények megkülönböztetése, ami szükséges a sor felismeréséhez és a beavatkozó (pl. gyomlálás) vezérléséhez is. Az alapvető különbség a levéltípusok között, hogy a terület jellemző gyomnövényének széle recés (66. ábra). Az ismétlődő jel sugallta a Fourier transzformáció alkalmazását.

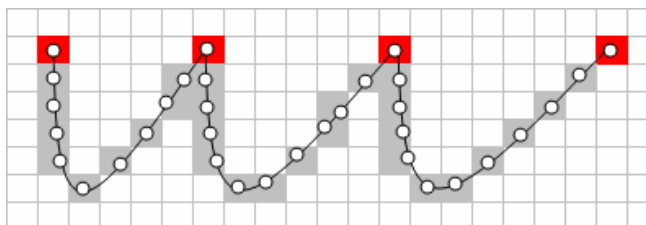
A teljes körvonal polár-koordinátás alakján végrehajtott FFT eredménye nem adott megfelelő statisztikai eredményt a csoportosításra. Ennek oka abban rejlik, hogy bár a jel a recés leveleken ismétlődő, a hullámhossz a levél különböző részein eltérő, ami a globális FFT csúcsokat elmossa. Így az FFT lokális alkalmazása, mozgó-mintán, azaz a körvonal n szomszédos kiválasztott pontján való végrehajtása ígérte az átlagos hullámhossz és amplitúdó meghatározását.

Az FFT algoritmust az $x(t)$, $y(t)$ vagy a súlyponthoz viszonyított $r(t)$, $\varphi(t)$ függvények szekvenciáin végrehajtva viszont jelentkezik az önkényesen választott alaphullámhossz jelentős torzító hatása. Ezt a hanganalízis szoftveremnél (Firtha, 1998) bevált ablak-függvények használatával lehetett csökkenteni. Algoritmusomban háromszög, Hamming, Hanning, stb. ablakfüggvények választhatók.



67. ábra: Ablakfüggvények (a), 123,45 Hz-es sinusjel spektruma (b) és ablakolt spektrumai (c)

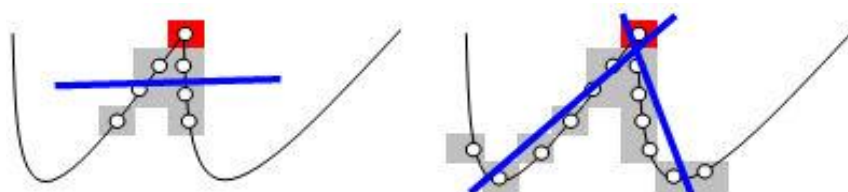
További problémát jelentett, hogy a kamera távolságából és felbontásából adódva a recék magassága mindössze pár pixelnyi volt. A digitális zajt csökkentette, az FFT csúcsokat erősítette algoritmusom, amelyik a kiválasztott csúcspontokat meghagyta, de a köztük lévő pixeleket regresszióval közelítette. A regressziós algoritmus feltétele, hogy az egész típusú koordináták valós közelítésének egész része nem változhat, azaz ugyanabban a pixelben kell maradnia.



68. ábra: Digitális zaj kiküszöbölésének illusztrációja

Algoritmusom már kiküszöbölte a változó hullámhossz és diszkrét mérés-pontok okozta zajt, de a lokális szekvencián végrehajtott FFT eredménye még mindig nem adott megfelelő eredményt. Ennek oka abban rejlik, hogy a levelek szélének mintázata messze nem harmonikus és nem periodikus. A Fourier transzformáció nem harmonikus jel esetén jelentősen kiemeli a felharmonikusok amplitúdóját is, ezért végül más módszerhez kellett folyamodni.

A körvonal adott hosszú szekvenciáit lineáris regresszióval közelítve (Vincze 1974), a numerikusan meghatározott második derivált írja le a körvonal görbületét (Hajós 1971, Szőkefalvi-Nagy et al. 1979). A nagy görbület-érték mellett a lineáris regresszió alacsony korrelációja jelzi a csúcs helyét. Töréspont meghatározásához jobb eredményt adott következő algoritmusom, amely adott pontból jobbra és balra is lineáris regresszióval közelít, regisztrálva a közelítések korrelációját is. A csúcsokat a jobbról-balról közelítő egyenesek minél hegyesebb szöge és a magas korrelációk jelzik.



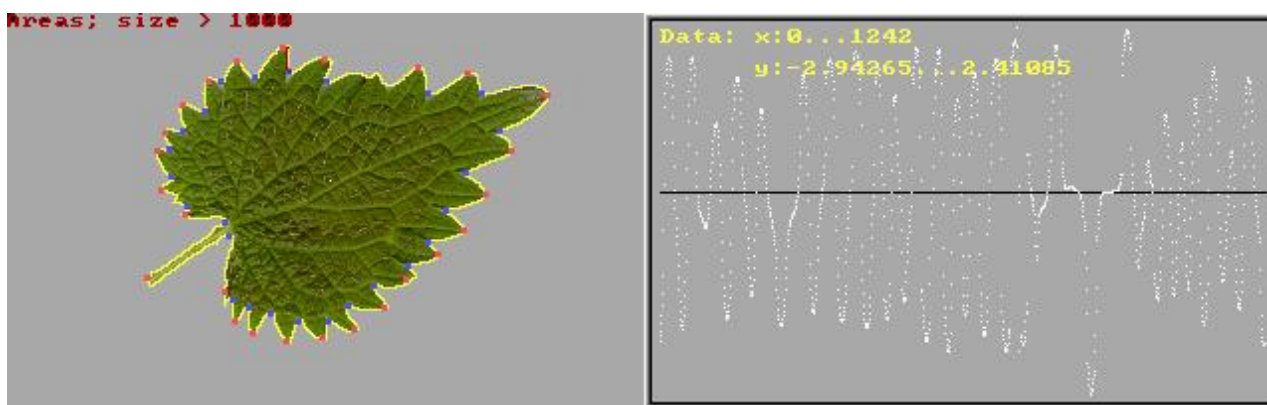
69. ábra: Görbület (a) és töréspontok (b) meghatározásának módszerei

A görbület helyett, a töréspontok numerikus meghatározása és kiemelése már elfogadható eredményt adott a levelek recézettségének jellemzésére. A töréspontok valószínűségét jellemző függvényt (70.b. ábra) a körvonal adott hosszúságú (20 pixel) szakaszainak lineáris regressziója alapján számította az algoritmus. A lokális maximumhelyek, azaz a csúcs-gyanús elemek közül, a következő lépésben ki kell választani azokat, amelyek nem digitális zajokból származnak. Ugyanezt a feladatot kell megoldani, amikor a struktúra leírásához olyan töréspontokat keresünk, amelyek között mesterséges görbével közelítendő az alak.

A túl rövid szakaszokat (pl. digitális zajt) algoritmusom a lineáris regresszió hosszának megfelelő beállításával automatikusan eliminálja. A további zajokat „Split-and-merge” eljárás küszöböli ki:

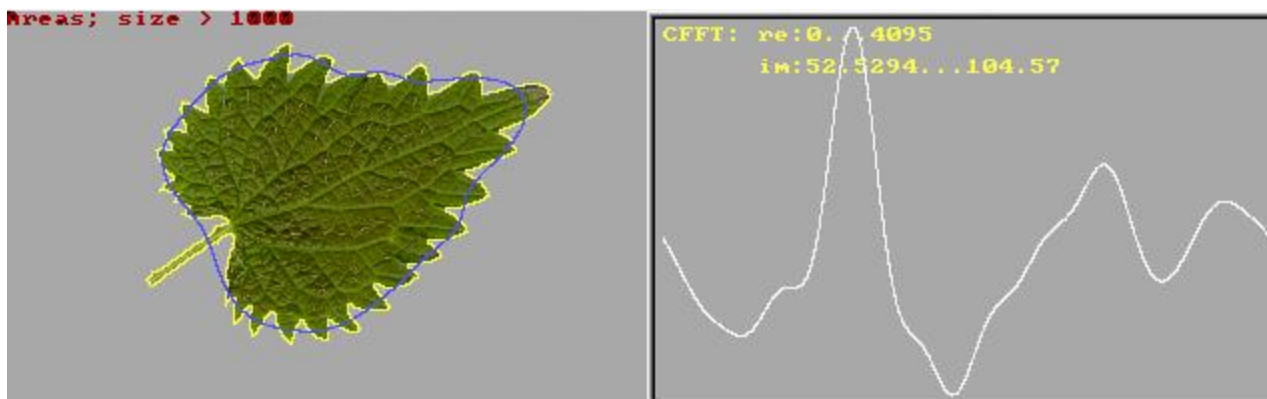
- összeolvasztja a túl rövid szakaszokat (szakasz hossza alatt a végpontok Euklideszi távolságát értve)
- újraszámolja a szakaszokon a globális szélsőértékeket, ennek megfelelően cserélve a végpontokat

Az eredményt a következő ábra illusztrálja (70.a. ábra).



70. ábra: Konvex és konkáv töréspontok meghatározása (a) a törést leíró függvényből (b)

A töréspontok meghatározása után a részleteket elhanyagoló közelítés történhet inverz Fourier transzformációval (71. ábra), a következő fejezetekben leírt célfüggvénnyel vagy mesterséges görbékkel.



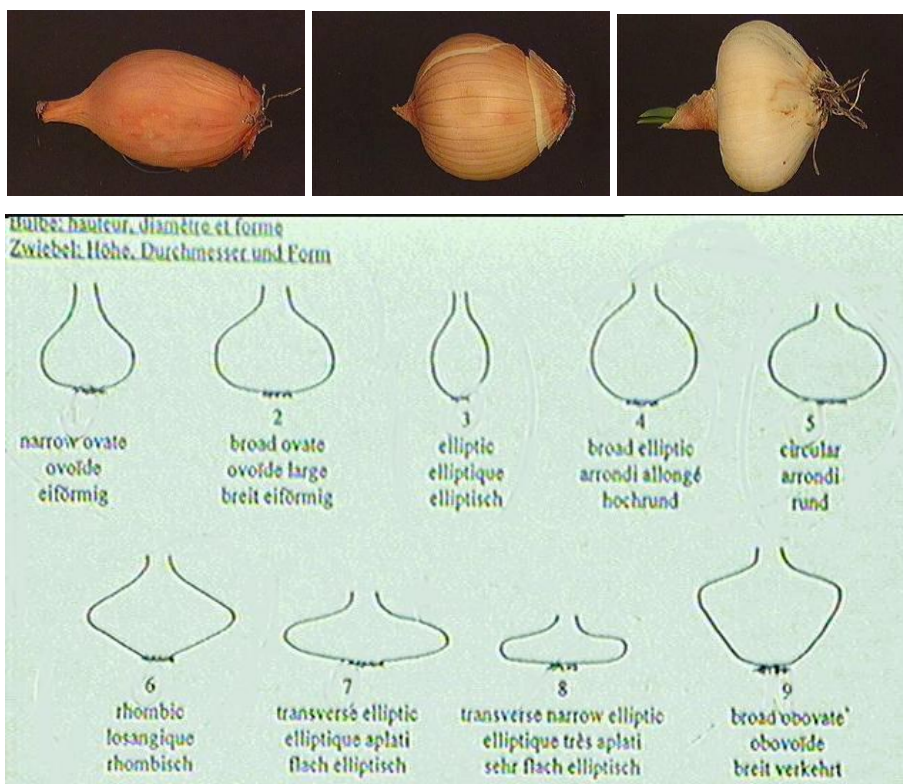
71. ábra: Részletek elhanyagolása inverz Fourier transzformációval

5.3.3 Objektum-csoport leírása cél-függvény segítségével

A termények alakjának leírásánál alapvető cél, hogy lehetőleg minél kevesebb, egymástól független, és az osztályokat jól elkülönítő paramétert nyerjünk a későbbi statisztikus vizsgálathoz.

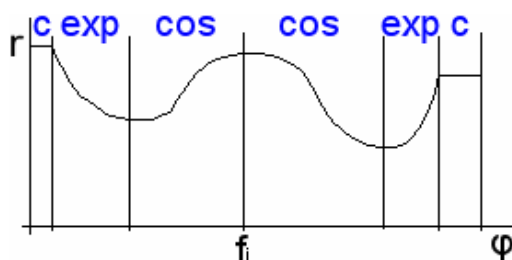
Általános recept keresése helyett egy adott objektumcsoport, pl. hagymák esetén megpróbálhatjuk lemásolni az érzékszervi osztályozás munkamódszerét. Hagyományosan az osztályzás, fajtaazonosság ellenőrzése táblázatok alapján, kvantitatív mérőszámok nélkül történik.

A 72. ábrán felsorolt hagymafajtáknál például jellemző a hossz tengely és a legnagyobb vastagság aránya, a szár felőli váll meredeksége, a gyökér felőli lefutás (Felföldi, 2002).



72. ábra: Néhány alapvető hagymaalak (OMMI)

FFT-vel megkeresve az objektum szimmetriatengelyét, kiszámítva a két oldal tengelyre vonatkozó átlagos vetületét, az alakfüggvény jól közelíthető az objektumtípusra jellemző analitikus függvények szekvenciáival. Hagymára például ilyen közelítésem: $c_1, \text{Exp}(), \text{Cos}(), \text{Cos}(), \text{Exp}(), c_2$.



73. ábra: Polár-koordinátás körvonal közelítése függvények szekvenciájával

Adott egyed alakját ebben az esetben a csúcsoakat és az asszimmetriát leíró három paraméter (f_0 , f_{0d} , f_{0t}), a szekvencia-határok (f_i), és az egyes függvények paraméterei (r_i , n_i) jellemzik. E paraméterek meghatározhatók a legkisebb négyzeteltérés módszerével, így az alak alig pár, jelen esetben 15 paraméterből rekonstruálható (74. ábra).

```

float F1= 0.072, R1=133.000, N12=2.940;           // parameters of onion-shape
float F2= 0.427, R2= 77.600;
float F3= 0.775, R3= 75.600;
float F4= 1.820, R4= 74.000;
float F5= 2.900, R5=107.000, N45=3.780;
float RadFn(float f)
{
    float x,r;
    //
    if(f<F1) {r = R1; goto RETN;}
    if(f< F2) {x = (F2-f)/(F2-F1); r = R2 + (R1-R2) * pow(x,N12); goto RETN;}
#define COS01(x) ((cos((1.0-x)*M_PI)+1.0)/2.0)
    if(f<=F3) {x = (f-F2)/(F3-F2); r = R2 + (R3-R2) * COS01(x); goto RETN;}
    if(f<=F4) {x = (F4-f)/(F4-F3); r = R4 + (R3-R4) * COS01(x); goto RETN;}
    if(f<=F5) {x = (f-F4)/(F5-F4); r = R4 + (R5-R4) * pow(x,N45); goto RETN;}
    r = R5;
RETN:
    return( r );
}

```

74. ábra: Hagyma-alak célfüggvénye

DEBI.exe („Data Estimation Based on Searching the Minimum of Mean Square Error”) konzol alkalmazásom adatsort közelít adott N-dimenziós függvénnyel, numerikusan keresve az eltérés négyzetösszeg minimumhelyét (Henrici 1985):

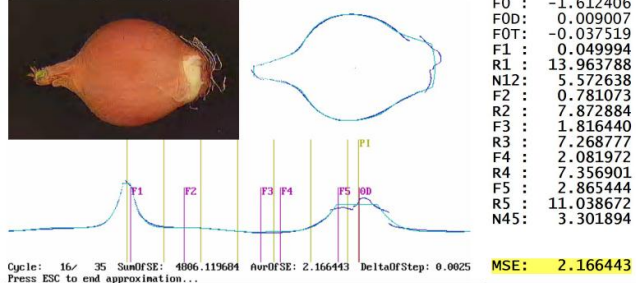
1. Algoritmusom először az N-dimenziós teret egyenletesen felosztva, a legkisebb értéket adó pontot választja kiindulópontul.
2. A pontból parciálisan minden irányban ellépve ($2N$ lépés), megkeresi a legkisebb értéket.
3. Ha talált kisebbet, akkor odalép és növeli a lépés-hosszat.
4. Ha nem talált kisebbet, akkor csökkenti a lépés-hosszat.
5. Ha túl kicsi a lépés-hossz, akkor leáll a ciklus (lokális minimumot talált).

A szoftver ciklusonként, grafikusán megjeleníti az adatsort, annak közelítését és az eltérést. Jól választott függvény-szekvencia és kezdő-paraméterek esetén a megtalált lokális minimum egyben globális minimumhely is. A minimumhely megtalálása után az eltérés adatsor menthető, azaz alapja lehet egy következő függvénnyel való közelítésnek.

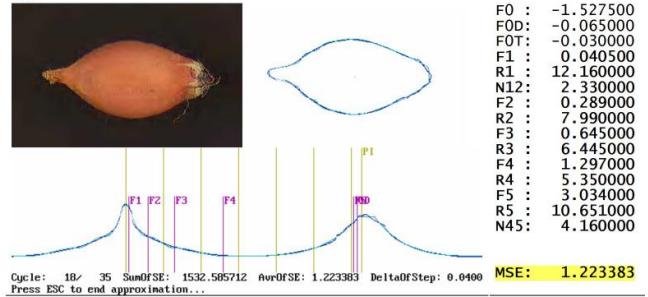
A 75. a. ábrán, négy hagymafajta mintaegyedeinek 15 paraméterrel való közelítésének eredményei azt mutatják, hogy az átlagos négyzetes hiba (MSE) mindegyik bemutatott alak esetén kisebb volt, mint 3 pixel-négyzet.

A módszer hatékonyságát illusztrálja a 2a sorszámú egyed paramétereiből generált 3D modell (75.b. ábra). A valós idejű 3D megjelenítést Assembly nyelven fejlesztett konzol alkalmazásom végzi (Székely 1992, Fűzi 1999).

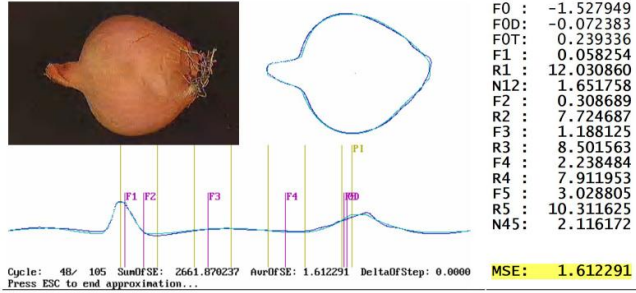
2a – FnSeq (3+12 paraméter):



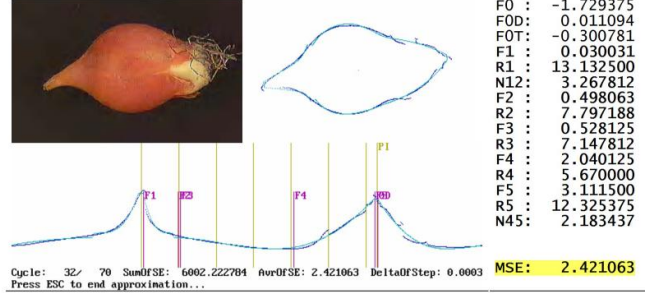
4a:



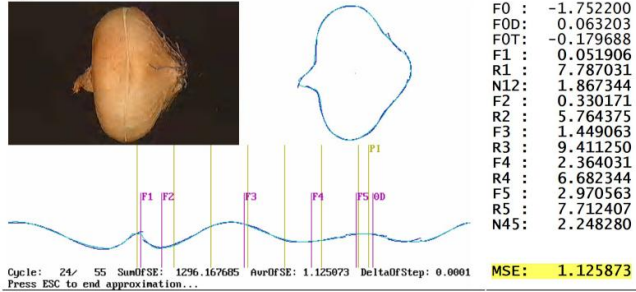
2b:



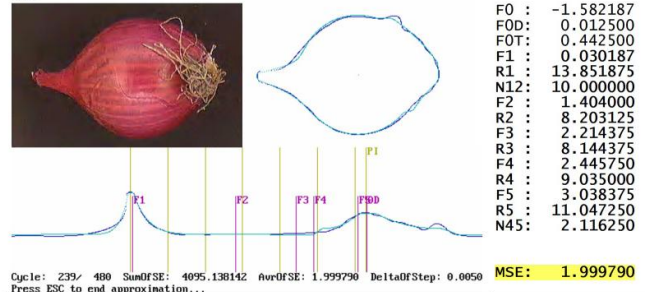
4b:



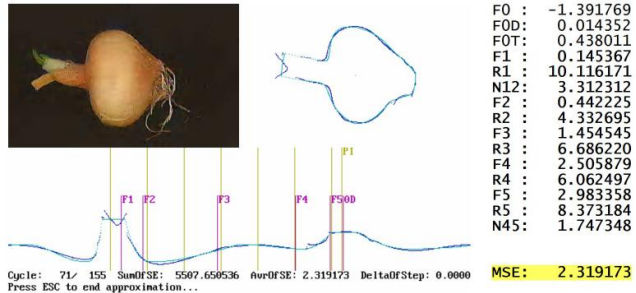
3a:



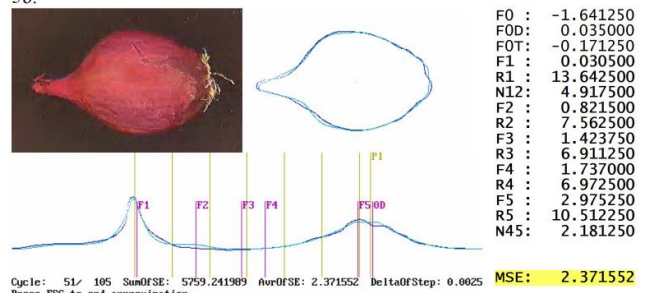
5a:



3b:



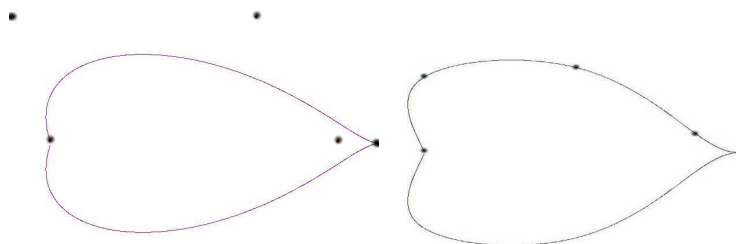
5b:



75. ábra: Közelítési példák (a) és a 2a egyed paramétereiből előállított 3D modell képernyőképe (b)

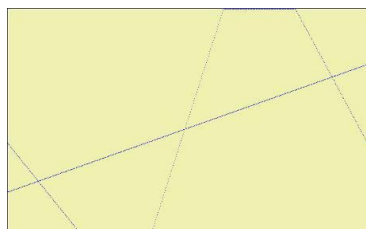
5.3.4 Struktúra általános leírása, görbült topológia

A természetes objektumok alakjának objektumcsoportra jellemző körvonal-függvénnyel való leírása mellett, a másik lehetséges út, az alak általános leírása. A 76. ábra illusztrálja, hogy 2 dimenziós mesterséges görbékől mindössze 5 alappontból milyen hatékonyan lehet egy körvonalat generálni. Elképzelésem szerint az általános leíráshoz, először meg kell keresni a körvonal jellemző töréspontjait, majd közöttük mesterséges görbéket illeszteni (Newman-Sproull 1985, Kepes 1987, Watt 1993).

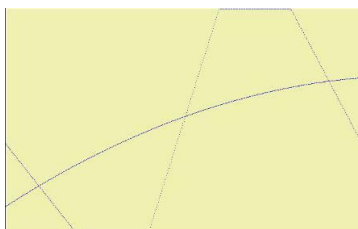


76. ábra: 5 pontból generált Bezier regressziós (a) és Spline interpolációs (b) görbék

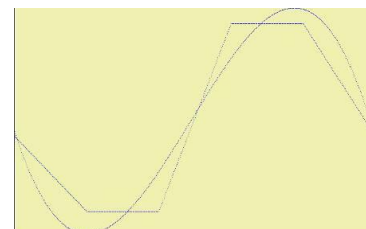
A megfelelő 2-változós görbe kiválasztásához 9 különböző 1-változós regressziós és interpolációs algoritmust implementáltam (Móricz 1983, Henrici 1985, Kátai 1992, Numerical recipes 1993), majd próbáltam ki különböző adatsorokon. Jelleget illusztrálja a következő, 77. ábra.



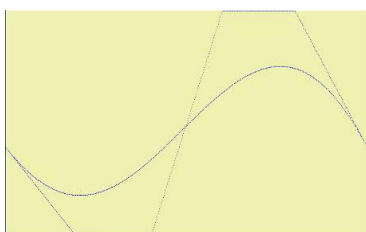
Lineáris regresszió



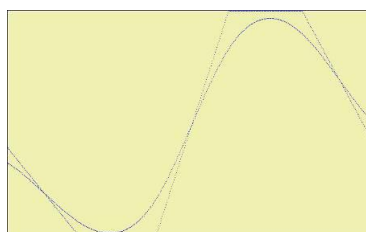
Négyzetes polinomiális reg.



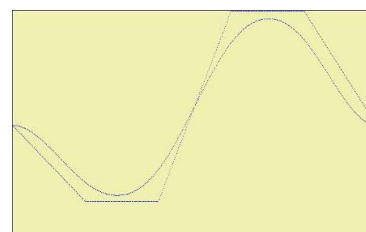
Köbös poli.reg.



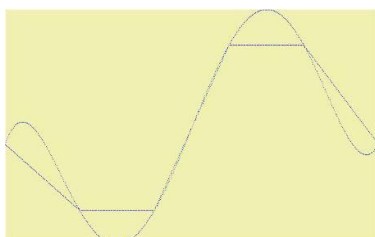
Bernstein poli.reg (Bezier)



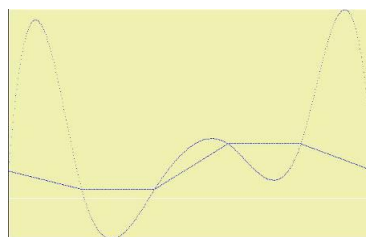
B-Spline (uniform, ciklikus)



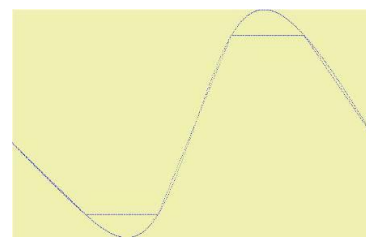
B-Spline (nem-uniform)



Lagrange interpoláció



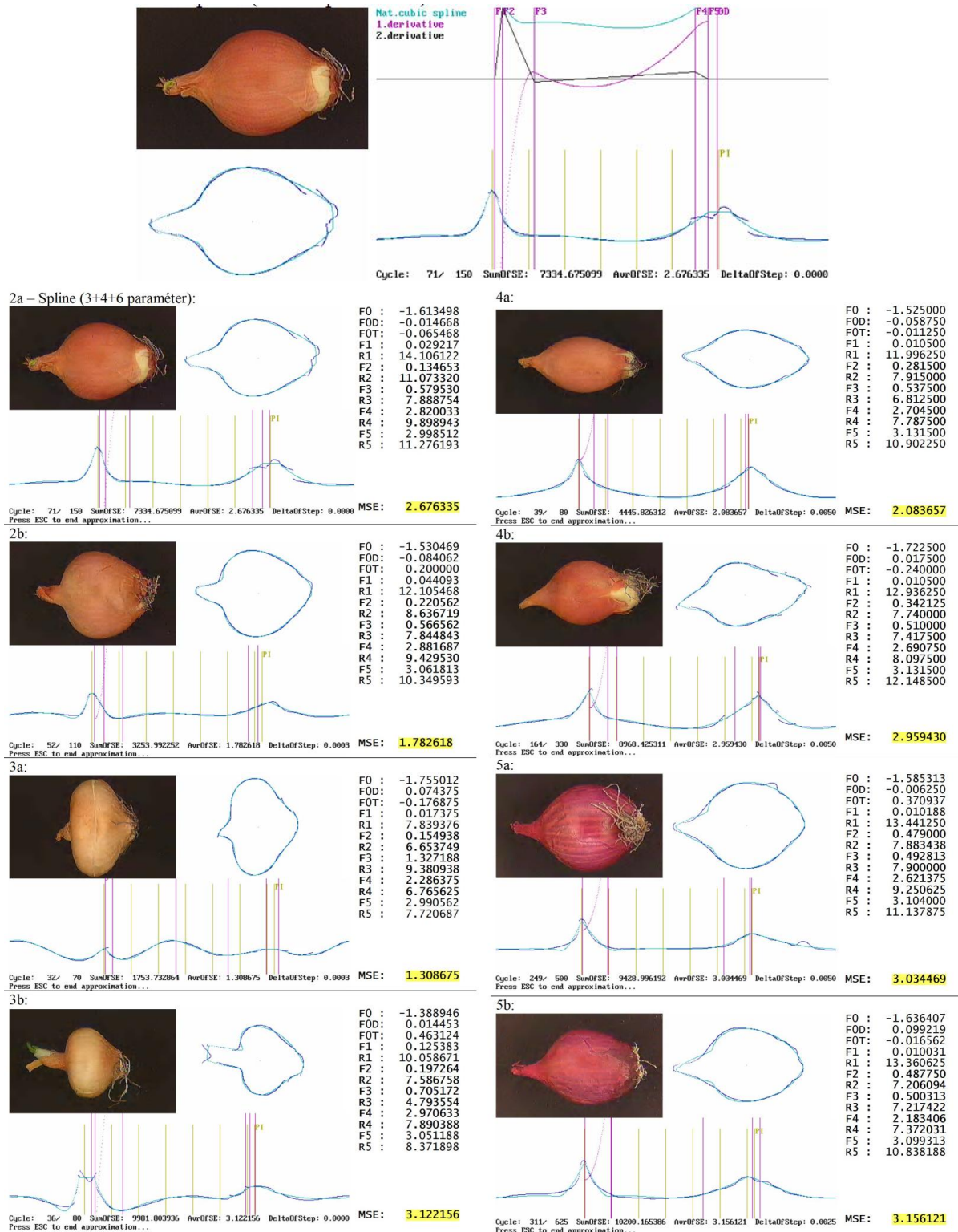
Köbös spline (kötött)



Köbös spline (natural)

77. ábra: Regressziós és interpolációs görbék illesztése az ekvidisztans $y=2,0,0,5,5,2$ adatsorra

Az előző fejezetben bemutatott hagyma-alakok leírására a természetes köbös spline közelítést használtam. A köbös spline sajátossága, hogy második deriváltja törtvonal (78. a. ábra). Fejlesztett célszoftverem optimálással számítja a csúcsokat (töréspontokat) és az asszimetriát leíró három paramétert, valamint a spline függvény bázispontjainak F_i helyét (szög) és R_i értékét (sugár). Futás közben grafikusan jeleníti meg az aktuális közelítést és annak hibáját. Az átlagos négyzetes hiba (MSE) 4 pixel-négyzet alatt maradt mindegyik bemutatott szélsőséges mintaalak esetén (78. b. ábra).

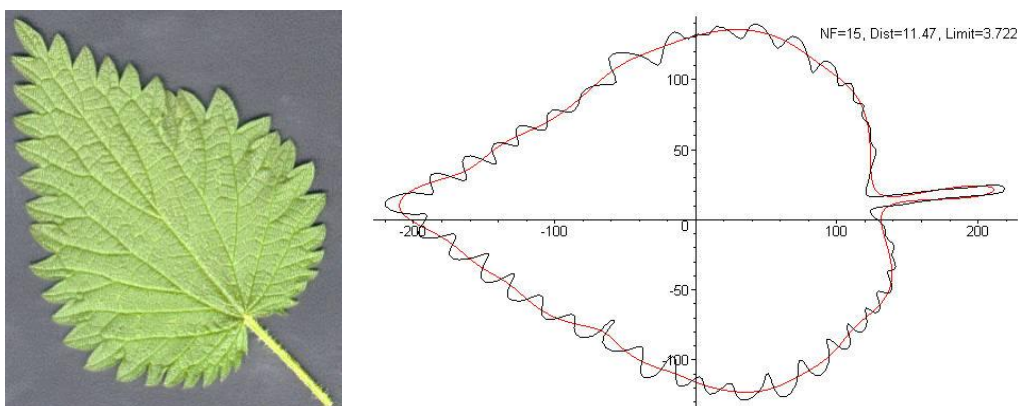


78. ábra: Köbös Spline és deriváltjai (a). Hagyma-alakok közelítési példái (b).

A hagyma-alakok vizsgálata egy újabb problémára vetett fényt. Még egyszerűbb struktúrájú természetes objektumok alakja sem szimmetrikus, hanem például görbült. Ezen görbült topológia kiküszöbölésére célszerű lenne olyan területtartó leképezést találni, amelyik megtalálva az alakzat tengelyét, azt lehetőleg minél jobban kiegyenesíti.

A speciálisan paprika rektifikálására (2 dimenziós görbült kép kiegyenesítésére) született algoritmus (Felföldi, 2002) először megfelelő állásba forgatja az objektumot, majd a paprika csúcsából kiindulva, a tengely pontjait a beírt körök középpontjai jelölik ki, ezzel megkapva az adott tengelyponthoz tartozó sugarat is.

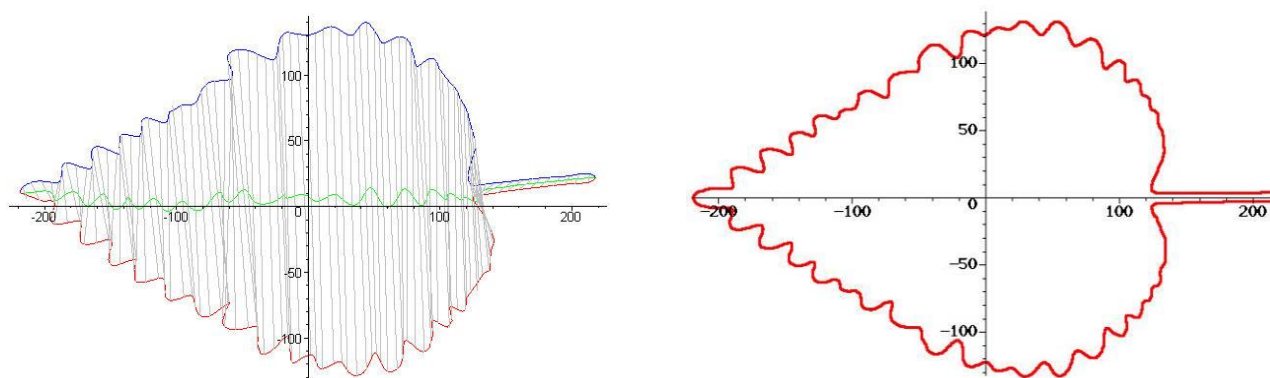
A módszer egyszerűbb alakzatokra alkalmazható. Érzékeny ugyanakkor nem csak a strukturális, de a lokális jellemzőkre is. Célkitűzésként egy olyan objektum tengelyét kívántam meghatározni, amelyek szélén a lokális zaj egy levélhez hasonlóan asszimmetrikusan helyezkedik el.



79. ábra: Struktúra meghatározása meghatározott fokú Fourier sorral (ábrán NF=15)

A lokális zajok kiküszöbölését, azaz a valódi struktúra kinyerését illusztrálja a 79. ábra. Egyre növekvő fokú (NF) Fourier sorral közelítve a körvonalat, a közelítéstől való átlagos eltérés (Dist) maximumát (Limit) meghatározva megkapjuk a struktúrát leíró körvonalat.

Az algoritmus a továbbiakban ennek a körvonalnak a spline-függvénnyel közelített tengelyét keresi meg "split & merge" módszerrel, ahol feltétel az, hogy a tengely görbülete (második derivált) minél kisebb legyen és hogy a tengelyre húzott un. bordák ne messék egymást.



80. ábra: Minimális görbületű tengely keresésével nyert bordák és a rektifikálás eredménye

A 80. ábrán bemutatott másik módszer Stanislav Bartonnal (Mendel University of Agriculture in Brno - Department of Principles of Technology, Masaryk University – Department of Information Technology) végzett, folyamatban lévő közös munkánk eredménye (Firtha, Barton 2006). Az implementáció Maple matematikai programcsomaggal készült (Maple, 2006).

A módszer általánosan nem írja le az olyan természetes objektumok alakját, ami mutat más szimmetriát is (pl. levelek fraktál szerkezete), más típusú topológiát is (pl. levelek sudár- vagy virágok sugár-topológiája). Ide is illik a bevezetésben említett tétel, miszerint a képfeldolgozásban nincsenek általános megoldások.

Az alakleírás kapcsán külön meg kell említeni, hogy térbeli objektumok alakjának leírásakor, a gyakorlati alkalmazások egy részénél nem elég csak egy nézet. Annak eldöntésére például, hogy egy futószalagon haladó paprika mennyire görbült, két egymásra merőleges nézet szükséges. A 2-dimenziós nézetekből a 3-dimenziós alakra való következtetés algoritmusaival jelen dolgozat nem foglalkozik.

5.3.5 Alakleírás alkalmazásai

A következő felsorolt alkalmazások mindegyike a bemutatott adatredukciós algoritmusokat implementáló komponenseim, mérőszoftverem vagy célszoftvereim felhasználásával készült.

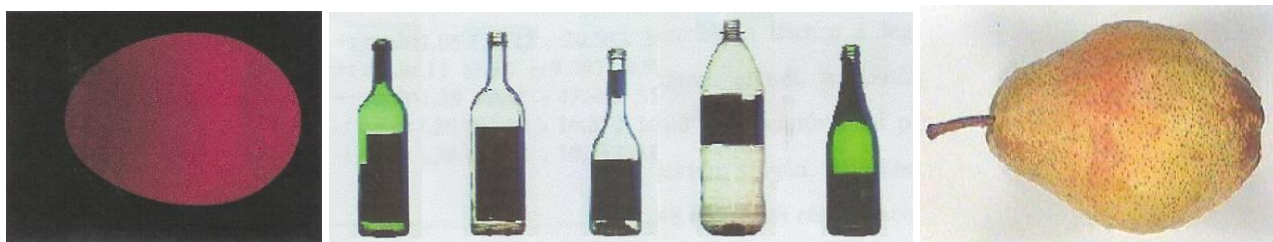
Átvilágított tojás számítógépes képfeldolgozás alapján történő minősítésére (81.a. ábra) az algoritmus az objektum képpontjainak kiválasztása után színtisztítást és az alakot leíró Fourier koordinátákat mentette. Ezen redukált adatok DA analízise után, tárolási idő szerint osztályozható volt a mintacsoport (Radeczky, 1999).

Palackok képfeldolgozási módszerekkel történő válogatására (81.b. ábra) szintén alkalmasnak bizonyult az algoritmus szelekciós módszere, a színt leíró statisztika és az alakot leíró FFT együtthatók. A mentett adatok DA analízisével (SPSS) megfelelően osztályozhatók voltak a palackok (Fülöp, 2000).

Kertészeti termények kvantitatív szín- és alakjellemzéséhez (81.c. ábra) szoftverem kalibrációs, képfelvételi, szegmentációs, színjellemzési és a Fourier alakjellemzés módszereimet használták. Szoftverem által mentett színtisztítást és az alakot leíró Fourier koordinátákat a Durbin-Watson és DA módszerek mellett két adatelemzésre fejlesztett célprogramommal értékelték ki:

- Cluster.exe: klaszter-analízis
- MBPN.exe:: multilayer backpropagation neural network

Az eredmények statisztikai analízise bizonyította algoritmusaim hatékonyságát (Szepes, 2004).



81. ábra: FFT alakjellemzés mintaképei: tojás, palackok, gyümölcs alakjára

Az alak lokális leírására többek között a kultúr- és gyomnövények szántóföldi megkülönböztetésénél volt szükség (82.a. ábra). A kultúrnövény (káposzta) jellemzően abban különbözött az egyéb levelektől, hogy levelének körvonala alapvetően sima volt, de a Fourier együtthatók alapján történő szétválasztás nem adott megfelelő eredményt, mivel a levél körvonalának egyenetlenségei nem harmonikusak és nem is ekvidisztansok (lásd 5.3.2.). Ebben az esetben is működött a körvonal görbületét mozgóátlagos lineáris regresszióval meghatározó algoritmusom (Hemming, 1998).

Törött gabonaszemek és egyéb szennyeződések látórendszeres azonosítására (82.b. ábra) szintén megfelelő vizuális paramétereket adtak szelekciós módszereim, a zajszűrésre és színtisztításra alkalmazott festő-eljárásom, a körvonal pontjainak meghatározása, valamint a görbület leírása lineáris és polinomiális regresszióval. A kinyert paraméterek elemzésével és statisztikai analízisével megfelelően azonosítani lehetett a szennyeződések (Baranyai, 2001).

Az OMMI Zöldség Fajtakísérleti Osztályán hagyma-fajták kvantitatív jellemzését is vizsgálják (Fehér et al., 2000). A hagyma látórendszeres osztályozásánál és minősítésénél (82.c. ábra) az alak leírásához, a szelekció és a körvonal pontjainak meghatározása után, célfüggvény paramétereit illesztette az e célra fejlesztett optimáló algoritmusom (DEBI.EXE). A körvonal és az illesztett függvény eltérés- négyzetösszegének minimumát kereső algoritmus (lásd. 5.3.3.) megfelelően írta le a hagymafajták közötti különbséget (Fehér, 1999).



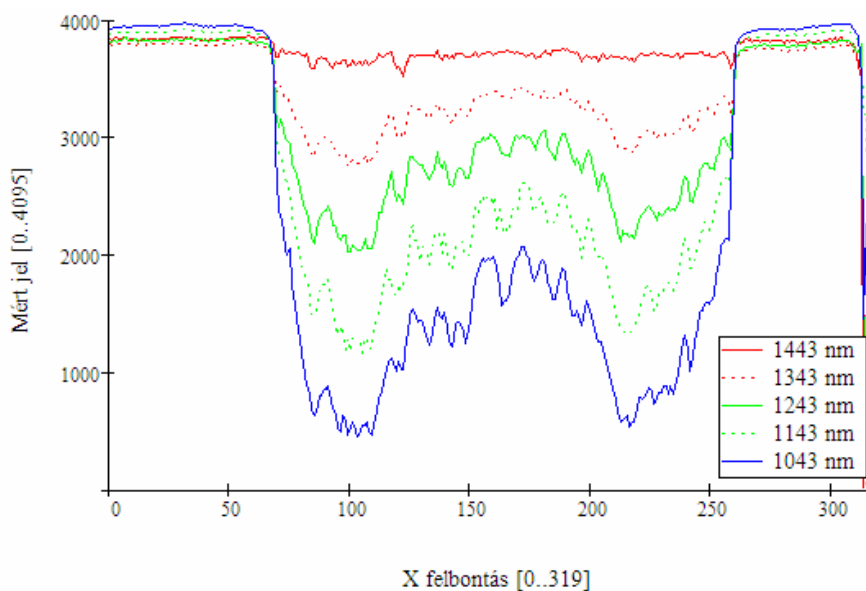
82. ábra: Lokális- és célfüggvényes alakjellemezés mintaképei: szántófield, gabona, hagyma-alak

Konvex alakzat struktúrája és részletei általánosan leírhatók a Fourier transzformációval. A nem harmonikus részletek leírhatók a görbület számításával. Objektum-csoport alakja jól leírható az érzékszervi bíráló paramétereit alkalmazó célfüggvény közelítésével. Természetes objektum görbült topológiája rektifikálható, alakja közelíthető mesterséges görbékkel.

5.4 Hiperspektrális mérőrendszer alkalmazása répszövetek vizsgálatára

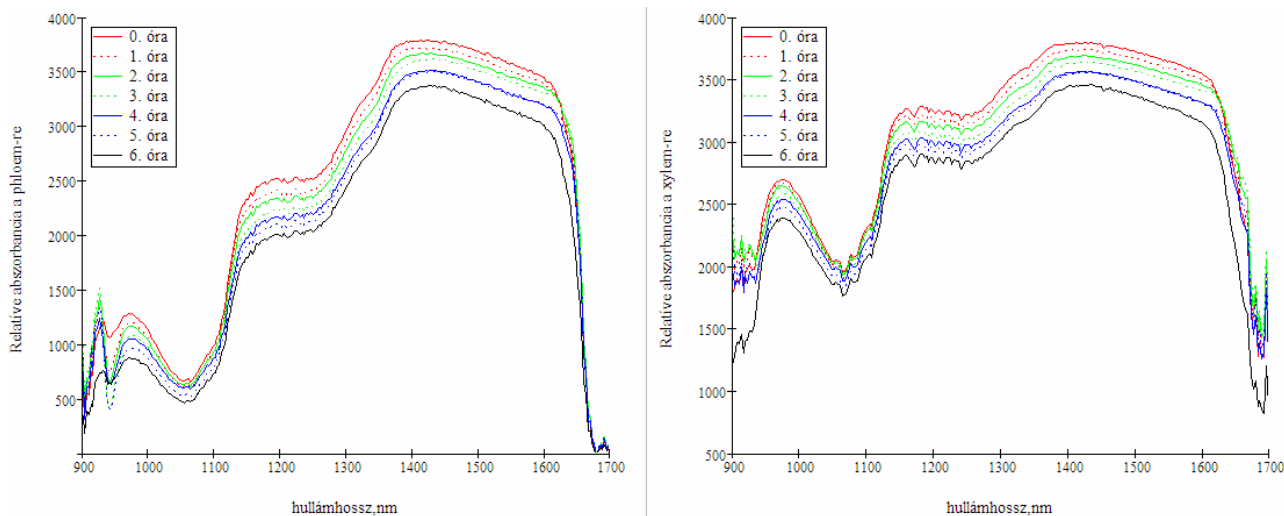
A mérőrendszer első bemutatott kísérlete során a vizsgált répfajták struktúrája RGB kép alapján is különböző volt, így várható volt a fajták különböző spektruma. Ennek ellenére az adott szövettípusok, mint hánccs (phloem) és fa-rész (xylem) spektruma mindegyik fajtán hasonlóan változott a száradási idővel. A sárgarépa, a 4.2.4. fejezetben bemutatott száradó levélhez hasonlóan viselkedett, azaz szövettípusok száradás közbeni, egymáshoz képesti különböző viselkedése mérhető azok spektrumának jellemzően különböző változásán. Ez magyarázható az egyes szövetek különböző funkciójával.

A 83. ábra, az egyes hullámhosszak relatív abszorbanciájának hely szerinti eloszlásával illusztrálja a nagy mértékű hely szerinti inhomogenitást. Az ábrázolt relatív abszorbancia, szemben az abszorbancia mennyiséggel, alacsony hullámhosszaknál (pl. 1043nm) jobban kiemeli az inhomogenitást, mint magas hullámhosszaknál, pl. 1443nm-nél, a tiszta víz egyik jellemző abszorpciós csúcsánál.



83. ábra: Relatív abszorbancia hely szerinti eloszlása 1043, 1143, 1243, 1343 és 1443nm-en

A relatív abszorbancia szórása 950 nm és 1650 nm tartományban, fajtán, időponton és szövettípuson belül megfelelően kicsi volt, bizonyítva a mérés stabilitását. A relatív abszorbancia átlaga mindkét szövettípuson monoton csökkent a 6 óra száradási idő alatt, ami szintén a mérések regularitását mutatta (84. ábra). Figyelembe véve, hogy a mérés érzékenysége 1100 nm körül a legnagyobb, a relatív abszorbancia csökkenése nagyrészt spektrálisan homogén volt.

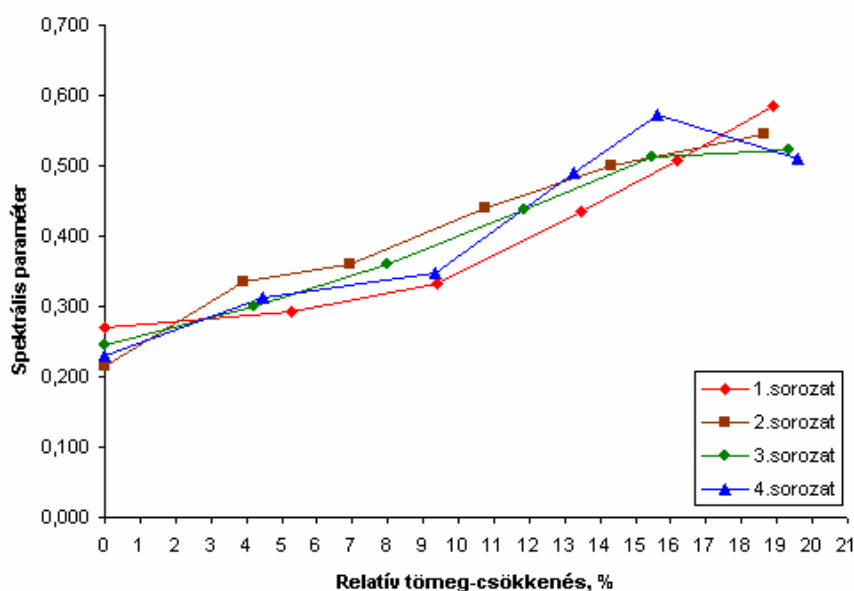


84. ábra: A relatív abszorbanca átlaga a phloem (a) és xylem (b) szöveteken monoton csökkent

A változából és szórásból számolt szignifikáns változás ugyanakkor nagyobb volt 1200 nm-en (a tiszta víz egyik, tartományon belül található abszorpciós csúcsánál) és kisebb 1450 nm körül. Céлом volt olyan, a száradási időt leíró paraméter számítása, amelyik független a mért spektrum átlagos intenzitásától, ezért e két hullámhosszon mért jelet kell összehasonlítani. A zaj kiküszöbölésére ± 50 nm-es tartományt átlagoltam.

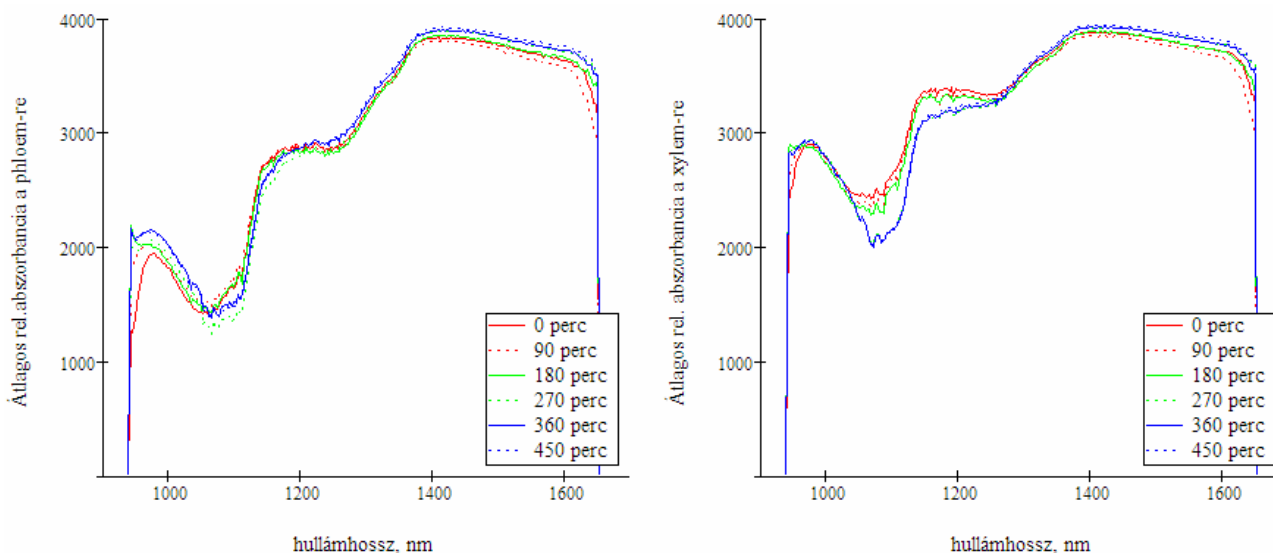
$$SP = \frac{\int_{1450-50}^{1450+50} RA(I) \cdot dI - \int_{1200-50}^{1200+50} RA(I) \cdot dI}{\int_{1200-50}^{1200+50} RA(I) \cdot dI} \quad (17)$$

Az így nyert spektrális paraméter (SP) mind a 4 mérési napon jól korrelált a mérés során számolt relatív tömegcsökkenéssel ($y = 0.0167x + 0.236$, $R^2 = 0,9235$) (85. ábra).



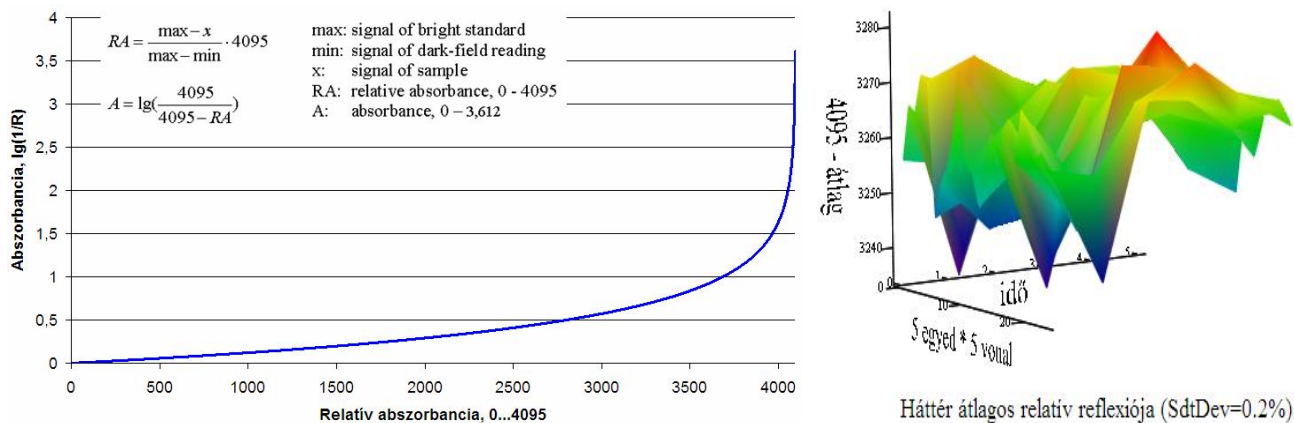
85. ábra: Háncson mért spektrális paraméter a relatív tömeg-csökkenés függvényében (a méréssorozatokban 6 szárítási időre számítottuk 21egyed mérésének átlagát)

A mérőszorozat második bemutatott kísérletében, a homogén változás kiküszöbölésére, a változás tartományának szűkítésére, jelentősen szigorítottuk a mérésutasítást és friss vágásfelülettel gátoltuk meg a roncsolt felület homogén fehéredését. A mért jel ennek megfelelően stabilnak bizonyult, igazolva a hiperspektrális mérési környezet alkalmazhatóságát (86. ábra).

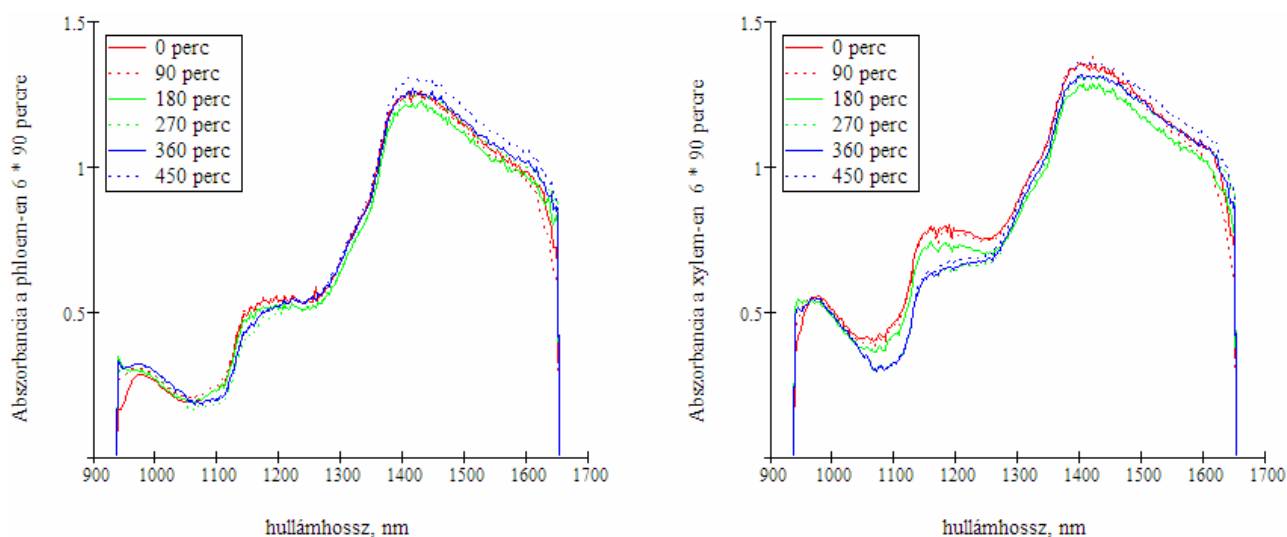


86. ábra: A relatív abszorbanca átlaga mindkét szövettípuson állandó volt idő szerint

A hiperspektrális mérések eredményét ellenőriztem a száradó répaszeletek NIR spektrométers mérésekkel (PMC Spectralyzer 10-25). Az összehasonlíthatóságához, a Mathcad algoritmusnak, a HIS rendszerrel mért relatív abszorbanciát konvertálni kellett a spektroszkópiában hagyományosan használt abszorbanca mennyiségre. A konverzió (87.a. ábra) jelentősen kiemelte a jellemzően magas elnyelésű háttér pár kvantum nagyságrendű intenzitását és az 1400 nm fölött megfigyelhető nagy relatív abszorpciójú tartomány zaját (kép melékletben). A hatás kiküszöbölésére algoritmusom az egyes képeken, a vizsgált objektum kiválasztása után számította a háttér átlagos intenzitását (87.b. ábra), és ennek megfelelően normálta a mért abszorbanciát. Az így nyert spektrum-átlagok már magas hullámhosszakon is stabilabbnak bizonyultak (88. ábra).



87. ábra: Abszorbanca számítása a relatív abszorbanciából (a). A normálás a háttér átlagos reflexiója alapján történik (b).



88. ábra: Abszorbancia átlaga a phloem (a) és xylem (b) szövettípusokon különböző szárítási időkre

A mért abszorbanciából elsőként azt kívántam igazolni diszkriminancia analízissel (DA), hogy az egyes szövettípusok spektrum alapján megkülönböztethetők. A vizsgálat során az első vonal képpontjainak spektrumát használtam tanuló-mintaként (2*630 spektrum tanuló-halmaz) és a többi négy vonal adataival (2*2520 spektrum teszt-halmaz) pedig ellenőriztem. Még az összes időadatot tartalmazó halmazon is jó eredményt adott a Fisher együtthatókkal végzett osztályozás (1. táblázat).

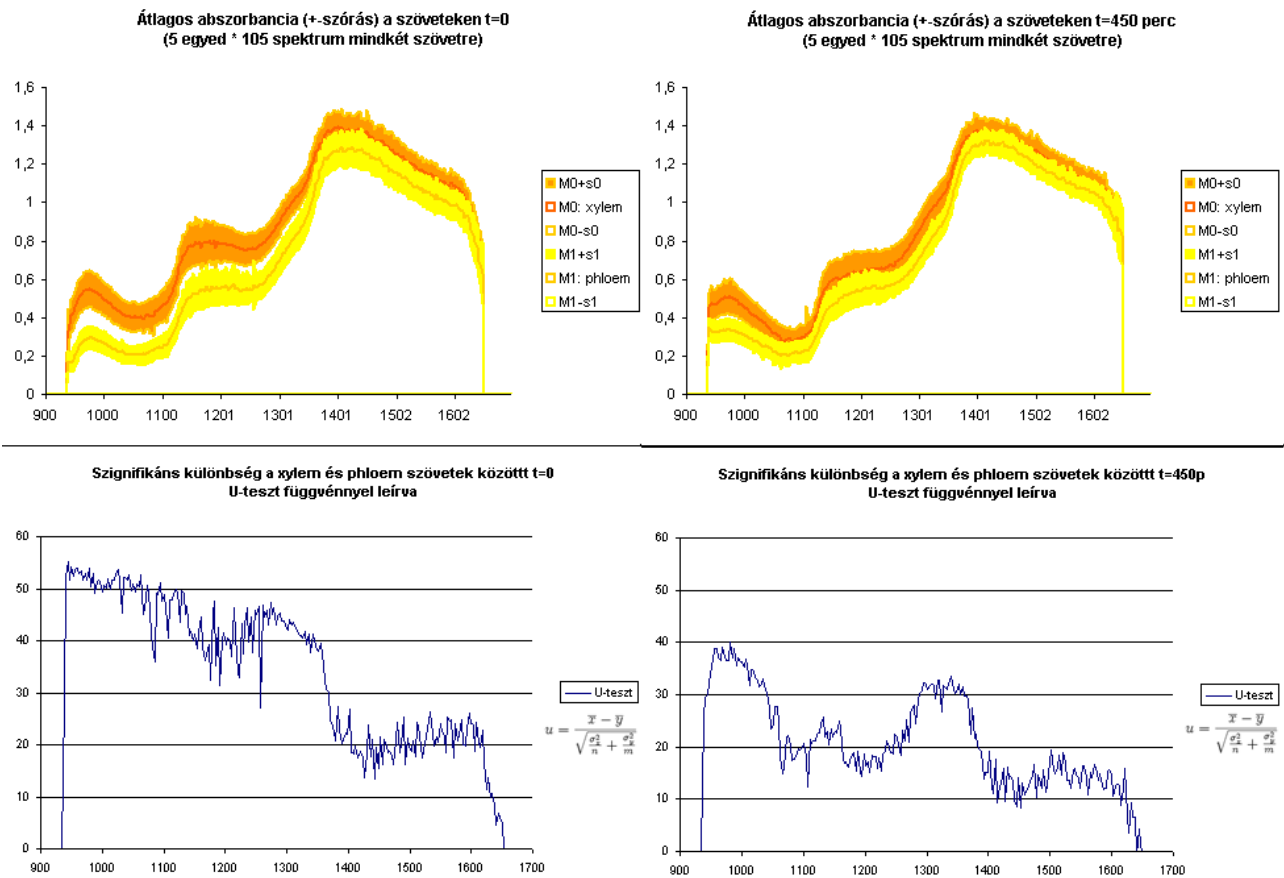
1. táblázat: Szövettípus szerinti DA osztályozás eredménye az összes időpont adataira, (fa és háncs szövetekre, 2*630 spektrum tanuló-, 2*2520 spektrum teszt-halmaz)

		becsült osztály		
		osztály	fa	háncs
tanuló-halmaz: 2*630 mérés	darab	fa	630	0
		háncs	0	630
	%	fa	100,0	0,0
		háncs	0,0	100,0
teszt-halmaz: 2*2520 mérés	darab	fa	2504	16
		háncs	20	2500
	%	fa	99,4	0,6
		háncs	0,8	99,2

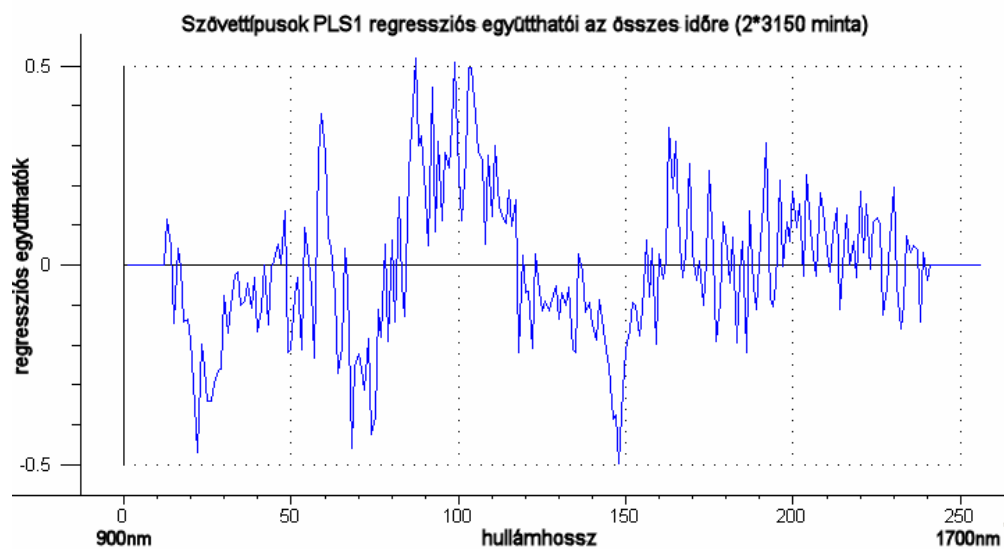
Tanuló-csoport 100,0% helyesen osztályozott

Teszt-csoport 99,3% helyesen osztályozott

A 4.2.3. fejezetben ismertetett mérési környezetben lehetőség van adott tulajdonság valós-idejű kiemelésére és az intenzitást leíró pseudo-kép generálására. Módszeremet azzal kívánom illusztrálni, hogy meghatározom a szövettípusok közötti különbséget kiemelő adatredukciós operátort. Az operátor jellemző hullámhosszainak meghatározására, a szignifikáns különbséget leíró U-teszt statisztikai függvényét (89. ábra) és a parciális legkisebb négyzetek módszerét (90. ábra) választottam.

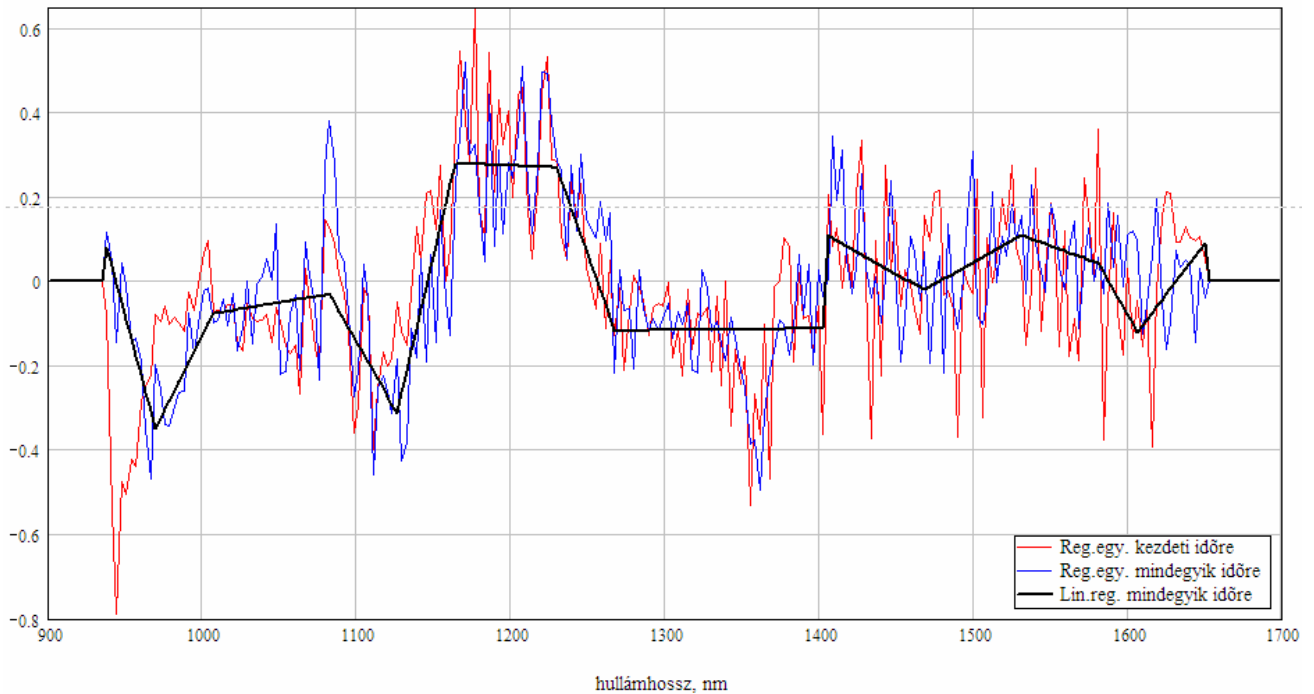


89. ábra: Szignifikáns különbség (U-teszt) a szövettípusok között a különböző időkre



90. ábra: PLS1 regressziós együtthatók az összes száradási időre

A szignifikáns hullámhosszakat a PLS1 főkomponens-együtthatóinak (latent variable loadings) nullához képest jelentősen eltérő értékei jelzik. Ugyanakkor a regressziós együtthatók függvénye szövettípusok osztályozása során erős fluktuációt mutatott. A szignifikáns hullámhosszak kiválasztásánál, az operátor stabilitása érdekében azt is megköveteltem, hogy a fluktuáció minimális legyen. Ez adott hullámhosszra, az adott szélességű környezetben számított szórással jellemezhető.



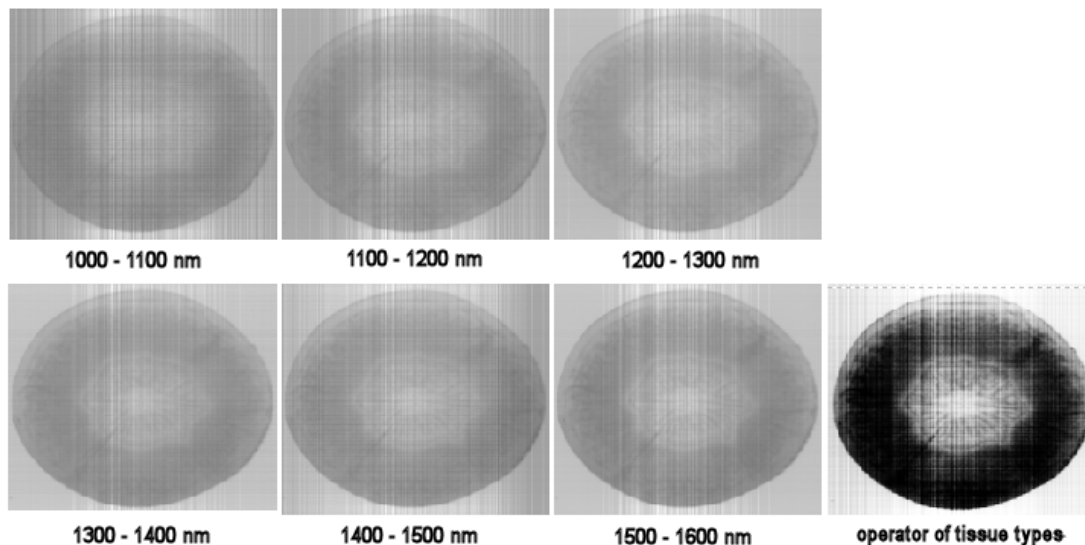
91. ábra: A kezdeti-, az összes időre számolt regressziós együtthatók és a közelítés törtvonallal

Mathcad algoritmus illesztett tört-vonalat a függvénymenet (átlag, fluktuáció) vizsgálatával kiválasztott bázispontok között, az összes időadatból számított regressziós együtthatók függvényére (91. ábra). A szignifikáns hullámhosszak súlytényezőit a kis fluktuációjú bázispontoknál a lineáris regresszió értékeként határoztam meg.

2. táblázat: Az ismertetett mérésorozatban, a mintacsoporton, a fa-szövettípus megkülönböztetésére számított szignifikáns hullámhosszak és súlytényezőik:

x: 0..255	hullámhossz	súly
34	1007 nm	-0,076
58	1085 nm	0,380
72	1126 nm	-0,424
97	1204 nm	0,281
148	1364 nm	-0,496
181	1468 nm	-0,002
201	1531 nm	0,110
217	1581 nm	0,043
225	1606 nm	-0,090

A 92. ábrán, a 100 nm széles szűrőssel mért képek lineáris kombinációjával illusztrálom egy fa-szövetípust kiemelő operátor eredményét. A súlyokat a regressziós együtthatók alapján határoztam meg. Annak ellenére, hogy a PLS1 regressziós együtthatók vektora a 100 nm széles tartományokon belül rendkívül zajos, az operátor látványosan kiemeli a fa szövetípust.



92. ábra: Példa a fa-szövetípust (xylem) kiemelő pszeudo-képre

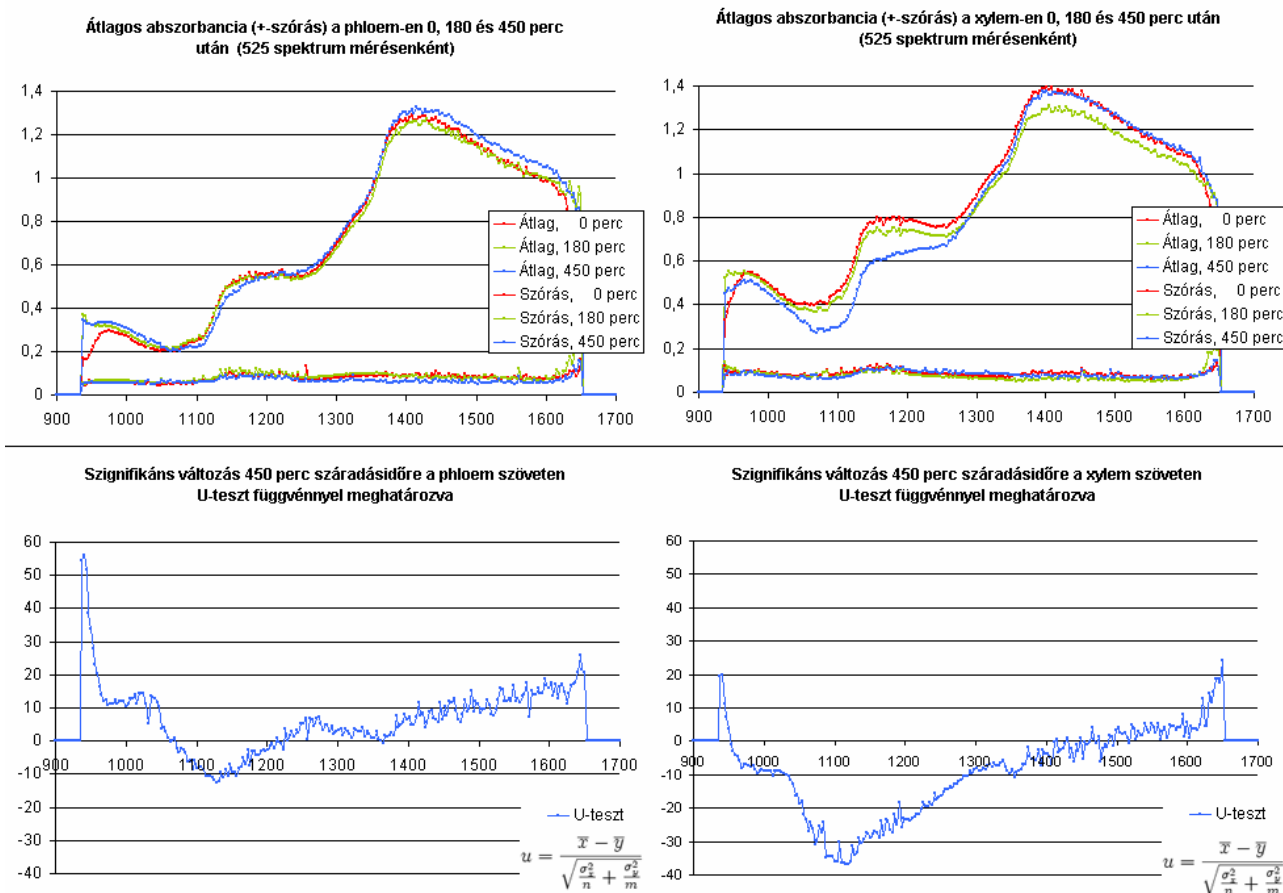
Következőkben a száradási idő szerinti osztályozhatóságot vizsgáltam DA analízissel. Spektrum alapján még a különböző szövetípusokat tartalmazó halmazon is lehetett osztályozni (97. ábra). A tanuló-halmazt minden időpontra megfelelően (legrosszabb 80,5%), a teszt-halmazt pedig csak az első 4 időpontra tudtam elfogadhatóan (legrosszabb 78,6%) osztályozni.

3. táblázat: Száradási idő szerinti DA osztályozás eredménye mindkét szövetípus adataira, (0..5 * 90 perc intervallumokra, 6*210 spektrum tanuló-, 6*840 spektrum teszt-halmaz)

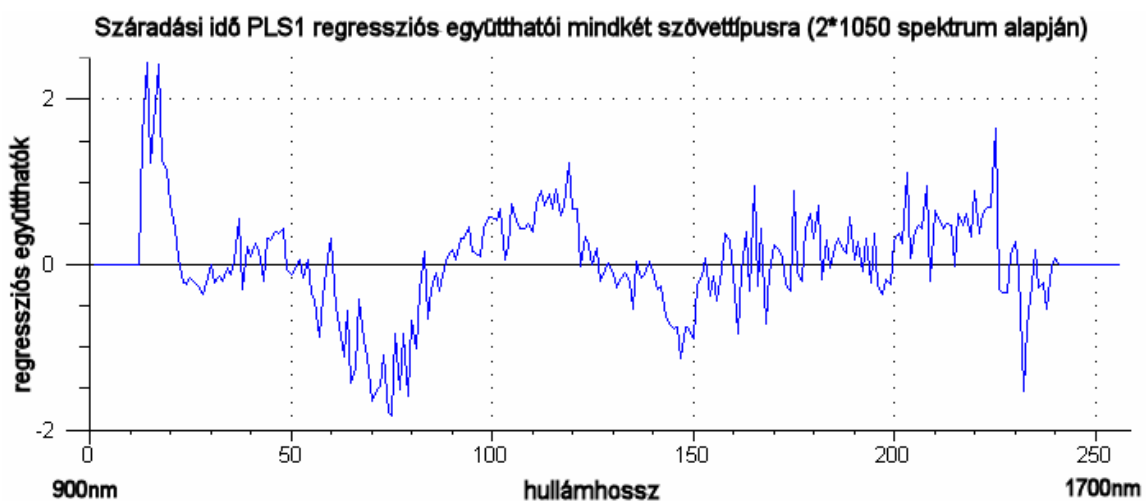
		becsült osztály						
		osztály	0	90	180	270	360	450
tanuló-halmaz: 6*210 mérés	%	0	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
		90	0,0	98,6	1,4	0,0	0,0	0,0
		180	0,0	4,3	95,7	0,0	0,0	0,0
		270	0,0	0,0	0,0	81,0	15,7	3,3
		360	0,0	0,0	0,0	5,2	80,5	14,3
		450	0,0	0,0	0,0	4,8	11,9	83,3
teszt-halmaz: 6*840 mérés	%	0	98,1	1,9	0,0	0,0	0,0	0,0
		90	0,1	91,2	8,7	0,0	0,0	0,0
		180	0,0	7,5	92,5	0,0	0,0	0,0
		270	0,0	0,0	0,0	78,6	16,9	4,5
		360	0,4	0,1	1,0	41,0	41,9	15,7
		450	0,0	0,0	0,0	38,9	26,2	34,9

Tanuló-csoport 89,8% helyesen osztályozott

Teszt-csoport 72,9% helyesen osztályozott

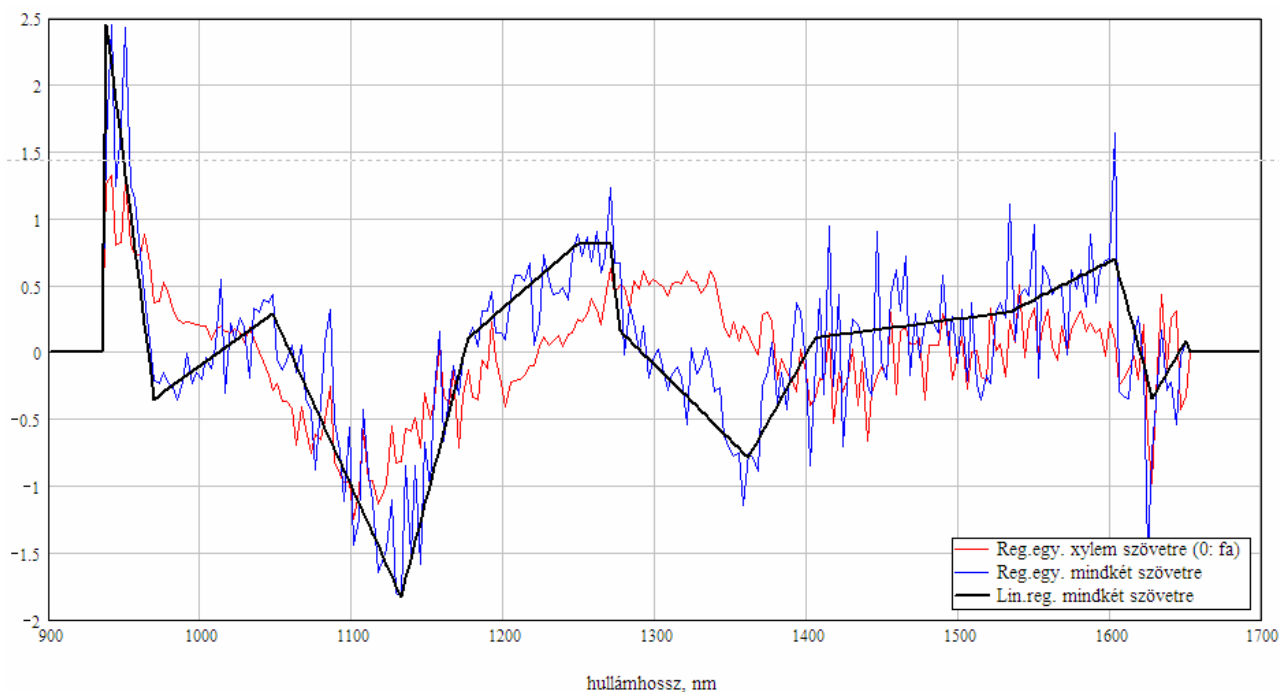


93. ábra: Szignifikáns különbség (U-teszt) a száradási idők között a különböző szövettípusokra



94. ábra: PLS1 regressziós együtthatók mindkét szövettípusra

Az U-teszt statisztikai függvény (93. ábra) és PLS analízis (94. ábra) alapján valószínűsíthetők az adott objektum-csoportra jellemző hullámhosszak. A szignifikáns hullámhosszakot és súly-tényezőit a szövettípusokhoz hasonlóan a PLS1 főkomponens- és regressziós együtthatókból számítottam. A tárolási idő szerinti osztályozásnál az együtthatók függvénye kevésbé fluktuált, mint a szövet-típusok leírásánál (95. ábra).



95. ábra: A fa- és mindkét szövettípusra számolt regressziós együtthatók, a közelítés törtvonallal

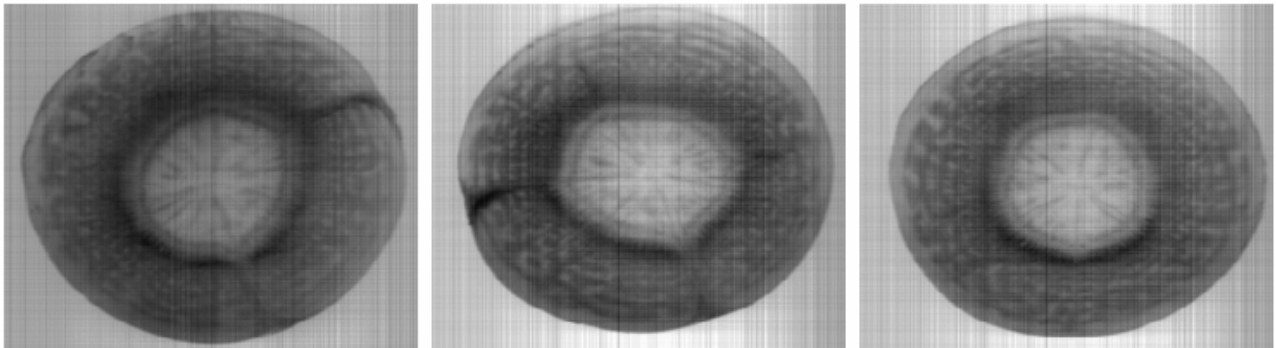
4. táblázat: Az ismertett mérésorozatban, a mintacsoporton, a tárolási idő megkülönböztetésére számított szignifikáns hullámhosszak és súlytényezőik:

x: 0..255	hullámhossz	súly
22	969 nm	-0,350
47	1047 nm	0,296
74	1126 nm	-1,826
88	1176 nm	0,103
111	1248 nm	0,812
147	1361 nm	-1,141

Az adatredukciós operátor előállításához végül, a szignifikáns hullámhosszak megfelelő lineáris kombinációját célszerű osztani egy olyan hullámhossz intenzitásával, amely invariáns az eltelt időre (normálás), ezzel ipari alkalmazás esetén is kiküszöbölve azon külső tényezők (megvilágítás, blende, zársebesség, stb.) hatását, amelyek a mért spektrumot homogénezen befolyásolják.

Objektum-csoport vizsgált tulajdonságának méréséhez tehát teszt-halmazon mért spektrumok statisztikai analízisével határozhatjuk meg a tulajdonság optimális adat-redukciós operátorát. Az ismertett algoritmus ezután valós-időben méri a tulajdonság hely szerinti eloszlását a teszt-halmazon. A mérendő halmaz egyedein az adatredukciós operátorral valós-időben detektálható adott

tulajdonság és az előfeldolgozással nyert képek később hagyományos képfeldolgozási algoritmusokkal vizsgálhatók. A 96. ábrán, példaképpen a fa-szövet típus intenzitásának növekedése figyelhető meg, a tárolási idő függvényében.



96. ábra: Példa, a fa-szövet típus (xylem) változását kiemelő operátorral nyert pseudo-képekre.

A szeleteket ugyanabból az egyedből nyertük 0, 90 és 180 perc száradás után (a, b, c kép).

Adatredukciós operátort és szignifikáns hullámhosszakot határoztam meg tehát mind a vizsgált szövetek megkülönböztetésére, mind a száradási idő becslésére. Ezen operátorok, méréseim szerint, sárgarépa esetén nem alkalmazhatók általánosan. Csak a vizsgált fajta (több répafajtára fajtára született mérési eredmények), adott populációjára (termő terület, szüret ideje, stb.) alkalmazható.

Más objektumok csoportjának vizsgálatára javasolt tehát,

- egy tanuló-csoport spektrális mérése és a vizsgált jellemzők mérése hagyományos módszerekkel,
- a spektrumok statisztikai értékelése alapján meghatározni a kívánt jellemzőt kiemelő adatredukciós operátort, majd
- a teszt-csoporton valós időben kiemelhetők a vizsgált tulajdonság(ok) intenzitásának hely szerinti eloszlása. A mentett intenzitás-képek később hagyományos képfeldolgozási algoritmusokkal vizsgálhatók.

A bemutatott alkalmazással igazoltam, hogy a mérési módszer és a fejlesztett környezet, kalibrációs- és adatredukciós módszer alkalmas élelmiszerek felületén, a beltartalmi jellemzők hely szerinti eloszlásának mérésére.

5.5 Új tudományos eredmények

1. Módszereket és az algoritmusokat implementáló szoftvert dolgoztam ki élelmiszerek és nyersanyagok vizuális paramétereinek kutatásához, első lépésben a vizsgált objektumok általános és hangolható szegmentálására:
 - Két színosztályt tartalmazó képek (pl. termény és háttér) szegmentációját az algoritmus, az intenzitás hisztogramjának küszöbértékével végzi. A hatékonyság javítására, színstatisztika alapján, automatikusan számítja ki az RGB térben optimálisan szétválasztó irányt. A szürkekonverziót meghatározó színirány a képek elemzése alapján manuálisan is beállítható. Az eljárás akár kettőnél több, nem Gauss eloszlású modusra számítja a küszöbértéket.
 - Összetett színű objektumok tartományainak (pl. paprika csoma nélküli termésének, gyümölcs adott színnel fedett tartományainak, termény felületi sérüléseinek, betegségeinek) szegmentációjára a klaszter-analízis egy tanulómintás változatát dolgoztam ki és implementáltam. A módszer adott szín és adott színezet kiválasztására is alkalmas.
 - Az algoritmus az egybefüggő tartományok képpontjait festő eljárással, szekvenciálisan dolgozza fel, a hibásan szegmentált tartományokat korrigálja, majd simítja a körvonal zajnak minősíthető konvex ill. konkáv részleteit.
2. Módszert dolgoztam ki a szegmentált objektumok felületének statisztikai jellemzésére (szín vagy vizsgált tulajdonságot kiemelő jellemző kovariancia-mátrixával), valamint meghatároztam a mért szín-koordináták szabvány színrendszerbe való konverziójának mérés technikai feltételeit:
 - Algoritmust dolgoztam ki a szenzor zajának csökkentésére és a képen, lényegkiemelő operátorok valós idejű végrehajtására.
 - A szín-konverzióhoz szükséges kalibrációs eljárást határoztam meg, valamint a kalibrációhoz használt etalonok iránti elvárásokat.
 - Méréselrendezéssel és a vezérlő szoftverrel mérhető az objektum térbeli kiterjedésének, a felület görbületének hatása, azaz a mért jel függése a beesési és visszaverődési szögtől.
3. Módszereket dolgoztam ki élelmiszerek és termények alakjának általános (automatizálási célú), speciális (szakértői rendszer célú) és morfológiai (struktúra, részletek és görbület) leírására:
 - Konvex objektum alakját általánosan, a körvonal (konvex burok) súlyponthoz számított polár-koordinátáinak Fourier-transzformáltjával írom le. Az együtthatók jellemzik az alak szimmetrikus, strukturális tulajdonságait (pl. nagy- és kistengely, orientáció) és a periodikus, harmonikus részleteket is. A módszer automatizálási és szakértői célokra is alkalmazható.

- Objektum-specifikus módszert dolgoztam ki adott objektumtípus (pl. hagymafajták) alakjának szakértői rendszerben használható jellemzésére. Algoritmussal az alak, az objektumcsoportra alkalmazott célfüggvény paramétereinek legkisebb négyzetek módszerével történő illesztésével jellemezhető.
 - Objektum alakjának nem periodikus és nem harmonikus részleteit (pl. levelek recézettségét) a görbület és a töréspontok meghatározásával írom le. Módszert dolgoztam ki, a kis felbontás okozta digitális zaj csökkentésére. (Levelek szántóföldi azonosítása történhet ez alapján.)
 - Objektum (pl. levelek) alakjának morfológiai jellemzését, a körvonal alapvető töréspontjainak meghatározásával és a szegmensekre illesztett regresszióval (inverz Fourier, köbös spline) végzem. A módszerrel egyszerűbb struktúrájú levél alakja alig pár paraméterrel leírható.
 - Algoritmust dolgoztam ki a növényeknél (levél, termés, gyökér, stb.) gyakran előforduló görbült szimmetriatengely rektifikálására. Az így kapott ortogonális topológiában meghatározhatók az alakot jellemző paraméterek (pl. nagytengely, kistengely hossza, stb.) valódi értéke.
4. Módszert és az algoritmusokat implementáló szoftvert dolgoztam ki élelmiszerek és nyersanyagaik hiperspektrális jellemzőinek laboratóriumi mérésére, spektrális jellemzők valós idejű kiemelésére, multispektrális célalkalmazások operátorainak kutatására:
- Algoritmussal a szenzor hőmérsékletének szabályozásával, az InGaAs mátrix pixelzajának korrekciójával, az inhomogén érzékenység kezelésével és a kalibrációs eljárás vezérlésével megfelelő jel-zaj viszonyt és stabil jelszintet biztosít. A mért spektrumok, a nem izolált környezet és az egyenetlen felület ellenére egyeznek a spektrofotométerrel ellenőrzött értékekkel.
 - Adatredukciós módszert dolgoztam ki a vizsgált tulajdonságok felületi eloszlásának valós idejű detektálására. Tanuló-csoport előzetes mérésének statisztikai analízisével határoztam meg a vizsgált tulajdonságok operátorait. A módszerrel, előfeldolgozással lényegesen redukálható a mért adatmennyiség. A nyert, intenzitást kifejező pszeudo-képek később a hagyományos képfeldolgozási algoritmusokkal vizsgálhatók.
 - Méréseim alapján a sárgarépa szövettípusai megkülönböztethetők és az egyes szövetek száradási idővel történő változása is detektálható spektrális méréssel. Tanuló-csoport analízisével meghatároztam a szövettípus és nedvesség-tartalom hely szerinti eloszlását leíró adatredukciós operátorokat és szignifikáns hullámhosszakat.

6 Következtetések és javaslatok

Dolgozatom alapvető célkitűzése volt olyan képfeldolgozó mérési környezetek kidolgozása, amelyek jel-zaj viszonya, stabilitása és reprodukálhatósága közelíti a hagyományos színmérőkét és spektrofotométerekét. Ehhez a mérések stabilizálásán és a jel erősítésén túl alapvetően két problémát kell kezelni: az objektum felületének definit megvilágítását, valamint az egyenetlen felületen mért jel megfelelő kiértékelését.

Szín trikromatikus képfeldolgozó rendszerrel történő egzakt mérésénél, vizsgálataim alapján szükségesnek tartom az objektumtípus előzetes vizsgálatát. Hiperspektrális mérésnél, a mért spektrumok beesési és visszaverődési szögtől való függését szintén mérni kell.

A kidolgozott trikromatikus képfeldolgozó rendszer alkalmas a képek előfeldolgozására, a vizsgált objektumok képpontjainak kiválasztására, a felületi jellemzők statisztikájának mentésére, valamint az alak jellemzésére. Objektumtípus mérésével, az általános és hangolható algoritmussal nyert, a felületet és alakot leíró paraméterek statisztikai értékelésével jól előkészíthető egy mérés ipari alkalmazása.

Ugyanakkor a képfeldolgozásban nincsenek univerzális megoldások. Az alapkutató után, adott ipari célfeladatra, speciális (gyorsabb, hatékonyabb) szegmentálási módszert, felületet jellemző operátorokat, objektum-típus alakját leíró közelítést lehet fejleszteni.

A kidolgozott hiperspektrális képfeldolgozó rendszer alkalmas a reflektált spektrum hely szerinti eloszlásának reprodukálható mérésére, megfelelő adatredukciós operátorokkal, tulajdonság (pl. nedvességtartalom) hely szerinti eloszlásának valós idejű mérésére. Az operátor meghatározására szükséges az objektumcsoport minta-halmazának előzetes mérése (kalibrálás) és a nyert adatok statisztikai analízise.

Mintaalkalmazásom, a száradó sárgarépa nedvesség-tartalmának mérési eredményei azt mutatják, hogy a módszer rendkívül érzékeny a felület megvilágítására, egyenetlenségére, a hőmérséklet változására. Új alkalmazás kutató munkájának legnagyobb részét a mérés kondicionálása és a spektroszkópiai méréssel történő ellenőrzés teszi ki.

Ugyanakkor a spektrális látórendszerek távérzékelési, mezőgazdasági, gyógyszeripari alkalmazásainak rohamos terjedése azt mutatja, hogy az élelmiszerek és nyersanyagaik felületének, bel-tartalmi jellemzőinek vizsgálatában is exponenciálisan növekvő számú alkalmazásra számíthat a módszer.

7 Összefoglalás (Summary)

Az európai piaci elvárások szigorítása miatt, egyre nagyobb az igény élelmiszerek, termények minőségének kvantitatív leírására, mérésére. Minőségellenőrzési-, automatizálási feladatokban különösen fontosak a gyors, roncsolás- és érintésmentes mérések, mint amilyenek az optikai módszerek. Az ipari gyakorlatban már elterjedt trikromatikus látórendszerrel mérhető a szín hely szerinti eloszlása és megfelelő képfeldolgozási algoritmusokkal jellemezhető a felület színe, mintázata és az objektum alakja. Az elsőként a távérzékelésben alkalmazott hiperspektrális mérési technikával ugyanakkor a reflektált spektrum hely szerinti eloszlása határozható meg, így megfelelő módszerrel becsülhető termények, inhomogén szerkezetű élelmiszerek egyes beltartalmi jellemzőinek hely szerinti eloszlása és idő szerinti változása a felületen.

Mindkét mérés-típus speciális ipari- illetve laboratóriumi használatát megelőzi a vizsgált objektum és tulajdonság kutatása, amihez általános és ugyanakkor hangolható mérési környezet szükséges. Dolgozatomban e két képfelvételi eszköz, a látórendszer és a hiperspektrális eszköz kutató-környezetének mérés-technikai és algoritmikus feltételeit, módszertanát vizsgáltam meg.

A trikromatikus képfeldolgozási módszerek kutatására kamerákat és kalibrációt vezérlő, a dolgozatban bemutatott képfeldolgozási algoritmusokat implementáló szoftvert fejlesztettem. Megvizsgáltam a mért RGB koordináták CIE színrendszerbe való konverziójának, azaz a színmérésnek feltételeit. A felület görbületének kezelésére módszert dolgoztam ki és mérőeszközt fejlesztettem a mért RGB jel beesési- és visszaverődési szögtől való függésének mérésére. Algoritmusokat dolgoztam ki automatikus és tanulómintás szegmentálásra, a szegmentáció zajcsökkentésére, a szín statisztikus leírására és a felület speciális jellemzésére. Módszereket fejlesztettem ki az alak általános, elsősorban automatizálási célú meghatározására, speciális, szakértői rendszer paramétereivel közelítő jellemzésére, valamint morfológiai leírására.

A hiperspektrális képfeldolgozás alkalmazására hardvert és kalibrációt vezérlő szoftvert fejlesztettem. A nem izolált, görbült felület mérésénél rendkívül fontos stabilitást és a megfelelő jel-zaj viszonyt algoritmikusan biztosítom.

Eljárásommal az objektumonként gigabájtnyi méretű hiperkocka valós időben feldolgozható a vizsgált jellemzők adatredukciós operátorokkal való kiemelésével. Az így nyert, a jellemzők eloszlását kifejező pszeudo-képek, később képfeldolgozási módszerekkel elemezhetők.

A mérőrendszer alkalmazásaként sárgarépa-szeletek szövettípusainak nedvesség-tartalmát leíró adatredukciós operátorokat határoztam meg tanulócsoporthoz statisztikai analízisével. Módszeremmel a különböző szövetek száradása detektálható, a tárolt sárgarépa állapota optikai méréssel becsülhető.

Summary

Non-destructive, non-contact and fast measurement methods are demanded for on-line industrial quality control tasks. Optical methods, like machine vision systems, allow real-time classification or discrimination of objects on the processing chain. By processing the spatial distribution of its RGB coordinates, an object can be identified, its spatial location can be determined and its visible properties, such as colour, texture and shape, can be described by quantitative properties.

Near Infrared Hyperspectral imaging (NIRHSI) is another emerging platform technology that integrates conventional imaging and spectroscopy to attain both spatial and spectral information from an object. Spectral properties, such as NIR reflectance, can detect invisible features, e.g. existence of chemical components of the surface. In order to detect a certain feature on a particular object, characteristic wavelengths must be determined by the analysis of sample spectra from that object. This fast and non-contact measurement method can be also used for real-time controlling or quality control tasks.

The industrial usage of both methods requires the preliminary investigation of the object. For this purpose general and flexible algorithms are needed. Such image processing segmentation methods of RGB were developed for RGB vision system. Necessary calibration process was developed to enable standard colour measurement of surface. Algorithms were developed to describe colour and texture. General, specific and morphologic methods were researched and developed for shape-description.

Two important problems in NIRHSI are those of stability of measurement and data load. In general, approximately 2% of pixels in NIR detectors are unserviceable or 'dead', containing no useful information. While this percentage of pixels is insignificant for single wavelength imaging, the problem is amplified in NIRHSI, where > 100 wavelength images are typically acquired. This paper describes methods to get efficient signal-to-noise ratio and stabilize measurement. It describes systematic procedures for conditioning the temperature and compensating for 'dead' pixels in the NIR sensor.

Hyperspectral imaging experiments generate large amounts of data (typically > 50 MB per image), which tend to overwhelm the memory capacity of conventional computer systems. This inhibits the utilisation of NIRHSI for routine online industrial application. This paper describes an approach for reducing the data load of hyperspectral experiments by using sample-specific vector-to-scalar operators for real time feature extraction.

The feasibility of this system was tested for prediction of moisture content in carrot tissue.

8 Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretnék köszönetet mondani

Dr. Felföldi József tanszékvezető egyetemi tanárnak,
a látórendszer fejlesztéséért és alkalmazások kutatásáért,

Dr. Fekete András professzor úrnak,
az ösztönzésért és segítségért,

Dr. David Funk professzor úrnak,
Dr. Zana János egyetemi adjunktusnak,
Dr. Baranyai László egyetemi adjunktusnak,
az ötletekért, szakmai segítségért és javaslatokért

és

a **Fizika-Automatika Tanszék** összes munkatársának,
a segítségért és bátorításért.

9 Mellékletek

9.1 Irodalom-jegyzék

- Abu-Khalaf, N., Bennedsen, B.S. & Bjørn, G.K. (2004) Distinguishing carrot's characteristics by near infrared (NIR) reflectance and multivariate data analysis. *Agricultural Engineering International: the CIGR Journal of Scientific Research and Development. Manuscript FP 03 012* 6:1-17.
- Álló G., Füglein J., Hegedűs Gy. Géza & Szabó J. (1993) Bevezetés a számítógépes képfeldolgozásba. *BME Mérnöktovábbképző Intézet, Budapest*
- Baranyai L. (1997) Gabonaszemek szín- és alakjellemzőinek meghatározása számítógépes képelemzéssel. *KÉE diploma, OTDK I. hely, Témavezető: Firtha Ferenc*
- Baranyai L. (2001) Relationship between visual parameters of seed grains measured with digital image processing. *SzIE PhD, Témavezető: Fekete András*
- Belie, N.D., Pedersen, D.K., Martens, M., Bro R., Munck, L. & Baerdemaeker, J.D. (2003) The Use of Visible and Near-Infrared Reflectance Measurements to assess Sensory Changes in Carrot Texture and Sweetness during Heat Treatment. *Biosystems Engineering, Volume 85, Issue 2, Pages 213-225.*
- Benkő T., Benkő L., Tóth B., Kiss Z. (1992) Windows felhasználói programok Borland C++ környezetben. *ComputerBooks, Budapest*
- Benkő T., Benkő L. & Tóth B. (1996) Programozunk C nyelven. *ComputerBooks, Budapest*
- Benkő T., Benkő L., Jekatyerina, K. & Tamás P. (1999) Windows alkalmazások fejlesztése C++ Builder 3 rendszerben. *ComputerBooks, Budapest*
- Büning-Pfaue, H. (2003) Analysis of water in food by near infrared spectroscopy. *Food Chem.* 82 107-115.
- Champagne, C.M., Staenz, K., Bannari, A., McNairn, H. & Deguise, J-C. (2003) Validation of a hyperspectral curve-fitting model for the estimation of plant water content of agricultural canopies. *Remote Sensing of Environment, Volume 87, Issues 2-3, Pages 148-160.*
- Chan, R.H., Ho, Ch-W. & Nikolova, M. (2005) Salt-and-Pepper Noise Removal by Median-type Noise Detectors and Edge-preserving Regularization. *IEEE Transactions on Image Processing, 14 (2005), Pages 1479-1485.*

- Cho, B.-K., Chen, Y.-R. & Kim, M.S. (2007) Multispectral detection of organic residues on poultry processing plant equipment based on hyperspectral reflectance imaging technique. *Computers and Electronics in Agriculture, Volume 57, Issue 2, 177-189.*
- CIE-IEC joint publication (1987) International Lighting Vocabulary. 4th ed. *Commission Internationale de l'Eclairage, CIE Publ. No. 17.4, IEC Publ. No. 50(845), Genf*
- Codex Alimentarius Hungaricus (1994) Magyar Élelmiszerkönyv. Földművelésügyi és Vidékfejlesztési Minisztérium, Élelmiszeripari Főosztály (<http://www.omgk.hu/MEKV>)
- Ezekiel, M. & Fox, K. A. (1970) Korreláció- és regresszió-analízis. *Közgazdasági és Jogi Könyvkiadó, Budapest*
- Farkasné M. K., Fehér A., Gyúros J., Kapitány J., Mártonffy B., Péntes B., Petrányi I., Porcs D., Terbe I. & Zatykó L. (1999) Paprika. Hajtatott, szabadföldi és fűszerpaprika. *Mezőgazda Kiadó, Budapest, ISBN 963-9121-75-4*
- Fehér A. (1998) *Országos Mezőgazdasági Minősítő Intézet (OMMI), Zöldség Fajtakísérleti Osztály*
- Fehér A., Füleki L., Füstös Zs., Glits M., Mártonffy B., Péntes B. & Petrányi I. (2000) Hagymafélék. Vörös-, fok-, póré-, téli sarjadék-, metélő- és salottahagyma. *Mezőgazda Kiadó, Budapest, ISBN 963-9239-34-8*
- Felföldi J., F. Firtha F. & Győri E. (1994) Colour evaluation of fruit aided by PC based vision system. *J. of Food Physics, Vol. LVIII.:pp. 67-74.*
- Felföldi J. (2002) Quantitative shape characterisation of vegetable varieties. *Conference of European Agricultural Engineering, Warwick 2000, CD – 00-AE-007*
- Firtha F. (1998) Report on studying image processing methods. *Kutatási jelentés Jochen Hemming és Thomas Rath-tal közös szántóföldi kísérletek algoritmusairól, Universitat Hannover, Institut für Technik in Gartenbau und Landwirtschaft*
- Firtha F., Szedljk I. & Szántainé K. K. (2005) Színjellemzők mérése különböző típusú dohányfajták fermentációja során. *BCE, Lippay-Ormos-Vas*
- Firtha F., Fekete A., Kaszab T. & Takács P., Herold, B., Herppich, W., Borsa, B. & Kovács, L. (2006) Analysis of Carrot Drying by Hyperspectral Imaging. *EurAgEng 2006, Bonn: Agricultural Engineering for a Better World, poster no 926, fulltext no. 440119580699 (ISBN 3-18-091958-2)*
- Fűrús A. (2007) Magyar találmány: Paprika-válogató automata. *Kertészet és Szőlészet, 56/30, pp. 6-8.*
- Fülöp G. (2000) Számítógépes látórendszer alkalmazása italospalackok szétválogatására. *SZIE diploma, Témavezető: Felföldi József*
- Füzi J. (1999) Interaktív grafika. *ComputerBooks, Budapest*

- Gillay Z., Borsa B., (2007) Paprika felszínének becslése digitális képek használatával. *MTA Agrár Műszaki Bizottsága, Kutatási és Fejlesztési Tanácskozás, Gödöllő*
- Gisbert, S., Galina, T. (1993) Numerikus módszerek I-II. *ELTE-TypoTEX, Budapest*
- Hajós Gy. (1971) Geometria. *Tankönyvkiadó, Budapest*
- Hemming, J. & Rath, T. (2002) Image Processing for Plant Determination Using the Hough Transform and Clustering Methods. *Gartenbauwissenschaft, 67 (1). S. 1–10, 2002, ISSN 0016–478X.*
- Hemming, J., Henten, E-J., Tuijl, B.A.J. & Bontsema, J. (2004) A Leaf Detection Method Using Image Sequences and Leaf Movement. *International Conference on Sustainable Greenhouse Systems - Greensys2004*
- Henrici, P. (1985) Numerikus analízis műszakiaknak. *Műszaki Könyvkiadó, Budapest*
- Hermán R., Firtha F., Farkas J., Felföldi J. & Pedryc A. (2005) Kajsziabarack mag morfológiai tulajdonságainak számítógépes jellemzése. *MTA, Növénynevelési Tudományos Napok, Budapest*
- Herppich, W.B., Mempel, H. & Geyer, M. (1999) Effects of postharvest mechanical and climatic stress on carrot tissue water relations. *Postharvest Biology and Technology, Volume 16, Issue 1, 43-49.*
- HIPR2 (2003) Image processing learning resources web site: Hypermedia Image Processing Reference. (<http://homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/HIPR2/>)
- Hoffmann, G. (2005) CIELab ColorSpace. Department of Mechanical Engineering University of Applied Sciences in Emden (<http://www.fho-emden.de/~hoffmann/cielab03022003.pdf>)
- Hruschka, W.R. (1987) Data analysis: Wavelength selection methods. In Near-Infrared Technology in the Agricultural and Food Industries. 35–55. P. C. Williams and K. H. Norris, eds. *St.Paul, Minn.: American Association of Cereal Chemists*
- Jahne, B., Husecker, H. & Geisler, P. (1999) Handbook of Computer Vision and Applications (Vol 1-3). *Academic Press, London*
- Jung A., Kardeván P. & Tőkei L. (2006) Hyperspectral technology in vegetation analysis. *Progress in Agricultural Engineering Sciences 2, 95–117.*
- Kaffka, K.J. & Gyarmati, L.S. (1994) Quality determination in the food industry. *Proc. of the 6th. International NIRS Conference, Lorne.*
- Kaffka, K.J. & Seregély, ZS. (2002) PQS (polar qualification system) the new data reduction and product qualification method. *Acta Alimentaria, 31, 3-20.*
- Kato Z. & Ting Chuen Pong. A (2006) Markov Random Field Image Segmentation Model for Color Textured Images. *Image and Vision Computing, 24 (10), pp. 1103–1114.*

- Káta I. (1992) Numerikus analízis. *ELTE jegyzet. Budapest, Tankönyvkiadó*
- Kerningham, B.W. & Ritchie, D.M. (1988) A C programozási nyelv. *Műszaki Könyvkiadó, Budapest*
- Kepes J. (1987) Mikroszámítógépes grafika, grafikai algoritmusok. *Budapest, Műszaki Könyvkiadó*
- Lawrence, K.C., Park, B., Windham, W.R. & Mao, C. (2003) Calibration of a Pushbroom Hyperspectral Imaging System for Agricultural Inspection. *Transactions of the ASAE. Vol. 46(2): 513-521.*
- Lefcote, A.M., Kim, M.S., Chen, Y.-R. & Kang, S. (2006) Systematic approach for using hyperspectral imaging data to develop multispectral imaging systems: Detection of feces on apples. *Computers and Electronics in Agriculture, Volume 54, Issue 1, pp. 22-35.*
- León K., Mery D., Pedreschi F, & León F. (2006) Color measurement in L*a*b* units from RGB digital images. *Food Research International, Volume 39, Issue 10, pp. 1084-1091*
- Lukács Gy. (1982) Színmérés. *Műszaki Könyvkiadó, Budapest*
- Maple (2006) Maple 10 Reference Guide. *MapleSoft, Ontario, Canada*
- Martinovich L. & Felföldi J. (1996) Measurement of homogeneity of onion (*Allium cepa* L.) varieties and lines using computer based shape and colour analyses. *Horticultural Science 1996. 28. (3-4) pp. 69-75.*
- MathSoft (1994) Mathcad Reference Guide. *MathSoft Engineering and Education Inc., Cambridge, MA, USA.*
- Meer, F. & Jong, S.M. (2001) Imaging Spectrometry: Basic Principles and Prospective Application. *Remote Sensing and Digital Image Processing, Kluwer Academic Publishers, 2001, Netherlands*
- Meer, F. (2004) Analysis of spectral absorption features in hyperspectral imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, Volume 5, Issue 1, Pages 55-68.*
- Meer, F. (2006) The effectiveness of spectral similarity measures for the analysis of hyperspectral imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, Volume 8, Issue 1, Pages 3-17.*
- Móricz F. (1983) Numerikus analízis. *JATE jegyzet. Budapest, Tankönyvkiadó*
- Nemcsics A. (1990) Színdinamika. *Akadémia Kiadó, Budapest*
- Newman, W.M., Sproull, R.F. (1985) Interaktív számítógépes grafika. *Budapest, Műszaki Könyvkiadó*
- Némethy H. & Fehér M. (2002) Changes in the dry matter and sugar content of nantes type carrots during storage. *International Journal of Horticultural Science. Vol. 8. 67-71.*
- Nicolai, B.M., Lötze, E., Peirs, A., Scheerlinck, N. & Theron, K.I. (2006) Non-destructive measurement of bitter pit in apple fruit using NIR hyperspectral imaging. *Postharvest Biology and Technology, Volume 40, Issue 1, 1-6.*

- Noguláné N. M., Firtha F., Baranyai L., Meretei A., Jasmina, L. & Fekete A. (2008) Kenyérbél porozitásának becslése látórendszerrel. *MTA Agrár-Műszaki Bizottság: XXXII. Kutatási és fejlesztési tanácskozás*
- Numerical Recipes in C (1992 - 2003) The Art of Scientific Computing. *Cambridge University Press (<http://www.nr.com>)*
- Olasz A. (2004) Módszer alma felületi egyenetlenségének mérésére. *BCE TDK, Konzulens: Fekete András*
- Pethő Á. (1988) IBM PC/XT felhasználóknak és programozóknak III. BIOS. *SzámAlk, Budapest*
- Philipp, I. & Rath, T. (2002) Improving plant discrimination in image processing by use of different colour space transformations. *Computers and Electronics in Agriculture, Volume 35, Issue 1, July 2002, pp 1-15.*
- Radeczky L. (1999) Számítógépes látórendszer alkalmazása tojás minősítésében. *SzIE diploma, Témavezető: Felföldi József*
- Ruiz-Lopez, I.I., Cordova, A.V., Rodriguez-Jimenes, G.C. & Garcia-Alvarado, M.A. (2004). Moisture and temperature evolution during food drying: effect of variable properties. *Journal of Food Engineering 63. 117–124.*
- Ryan, M.J. & Arnold, J.A. (1997) Lossy compression of hyperspectral data using vector quantization. *Remote Sensing of Environment, Volume 61, Issue 3, Pages 419-436.*
- Simpson, P. K. (1990) Artificial Neural Systems: Foundations, Paradigms, Applications and Implementations. *Pergamon Press. New York*
- Szepes A. (2004) Számítógépes látórendszer alkalmazása kertészeti termények kvantitatív szín- és alakjellemezésére. *BKAE PhD, Témavezető: Felföldi József*
- Székely V. & Poppe A. (1992) A számítógépes grafika alapjai IBM PC-n. *ComputerBooks, Budapest*
- Székely V. (1994) Képkorrekció, hanganalízis, térszámítás PC-n. Gyors Fourier transzformációs módszerek. *ComputerBooks, Budapest*
- Szőkefalvi-Nagy Gy., Gehér L. & Nagy P. (1979) Differenciálgeometria. *Műszaki Könyvkiadó, Budapest*
- Török R. (2003) Mikroorganizmus telepek mennyiségi és minőségi vizsgálata számítógépes képfeldolgozással. *Szie diploma, Témavezető: Baranyai László*
- Tsai, F. & Philpot, W. (1998) Derivative analysis of hyperspectral data. *Remote Sensing of Environment, Volume 66, Issue 1, Pages 41-51.*

- Tzay Y. Young & King-Sun Fu (1986) Handbook of Pattern Recognition and Image Processing. *Academic Press, London*
- Úry L., Orosz J., Baki Z. & Pajor G. (1988) IBM PC DOS III. Programozói segédlet. *LSI, Budapest*
- Vincze I. (1974) Matematikai statisztika. *Budapest, Tankönyvkiadó*
- Vishnevsky E. (2005) Color Conversion Algorithms. Rochester Institute of Technology, Computer Science Department (<http://www.cs.rit.edu/~ncs/color/>)
- Vízhányó T. (2000) Colour Analysis for mushroom disease assessment. *Szie PhD, Témavezető: Felföldi József*
- Vranic, M., Knezevic, M., Seregély Zs., Bosnjak, K., Leto, J. & Perculija, G. (2005). Prediction of dry matter and crude protein content in fresh grass silage by near infrared spectroscopy. *Progress in Agriculture Engineering Sciences 1 (2005), Pages 57-75.*
- Warner, T.A. & Shank, M.C. (1997) Spatial autocorrelation analysis of hyperspectral imagery for feature selection. *Remote Sensing of Environment, Volume 60, Issue 1, Pages 58-70.*
- Watt A. (1990) 3D Computer Graphics. *Addison Wesley Publishing*
- Wilkie A. (2002) Colour Studies. Vienna University of Technology, Institute of Computer Graphics and Algorithms (http://www.cg.tuwien.ac.at/courses/ColourInComputerGraphics/Slides_2002/Colour/FarbeVO_04.pdf)
- X-Rite (2007) A Guide to Understanding Color Communication. X-Rite manual. (http://www.xrite.com/documents/literature/en/L10-001_Understand_Color_en.pdf)
- Xing J., Saeys, W. & Baerdemaeker J.D. (2007) Combination of chemometric tools and image processing for bruise detection on apples. *Computers and Electronics in Agriculture, Volume 56, Issue 1, 1-13.*
- Zude, M., Birlouez-Aragon, I., Paschold P.-J. & Rutledge, D.N. (2007) Non-invasive spectrophotometric sensing of carrot quality from harvest to consumption. *Postharvest Biology and Technology, Volume 45, Issue 1, 30-37.*

9.2 Publikációk, hivatkozások, egyéb szakmai tevékenység

1. Publikációk és visszhangjuk		Pont
1.1. Folyóiratcikkek		
1.1.1. IF-es folyóiratcikk		
1.	F. Firtha (2008) Detecting moisture loss of carrot samples during storage by hyperspectral imaging system – Acta Alimentaria, accepted, available online (ISSN 1588-2535)	10
2.	F. Firtha, A. Fekete, T. Kaszab, B. Gillay, M. Nogula-Nagy, Z. Kovács, D. B. Kantor (2008) Methods for improving image quality and reducing data load of NIR hyperspectral images. Sensors-Basel 2008, 8 (ISSN 1424-8220), pp. 3287-3298.	10
1.1.2. NEM IF-es folyóiratcikk, idegen nyelv		
1.	J. Felföldi, F. Firtha & E. Győri (1994) Colour evaluation of fruit aided by PC based vision system – Journal of Food Physics, Vol. LVIII.:pp. 67-74.	4
2.	J. Felföldi, F. Firtha & E. Győri (1995) Colour analysis of fruits and vegetables aided by PC based vision system - Hungarian Agricultural Engineering, 8/1995, pp. 43-45.	4
3.	L. Baranyai & F. Firtha (1997) Selection of broken kernels by image analysis - Quality Assessment of Plant Products, No. 3. (ISBN 80-213-0339-5), pp. 1-4.	4
4.	F. Firtha (2006) Controlling and Calibration of Hyper-spectral measurement - Journal of Food Physics, Vol. XVII-XVIII (ISSN 1416 – 2083), pp. 13-28.	4
5.	F. Firtha (2007) Development of Data Reduction Function for Hyperspectral Imaging - Progress in Agricultural Engineering Sciences, Volume III. (ISSN 1786-335X), pp. 67-88.	4
1.1.3. NEM IF-es folyóiratcikk, magyarul		
1.	Felföldi József, Firtha Ferenc, Győri Ernő (1994) Számítógépes látórendszer alkalmazása színkiértékelési feladatokra gyümölcsöknél. - Élelmiszerfizikai Közlemények 58/2: pp. 37-48.	2
1.2. Publikáció konferencia kiadványban		
1.2.1. Magyar nyelvű (teljes)		
1.	Felföldi József, Firtha Ferenc, Győri Ernő (1995) Gyümölcs és zöldség színelemzése számítógépes látórendszerrel - MTA Agrár Műszaki Bizottsága, Kutatási és Fejlesztési Tanácskozás, Gödöllő, abstract:p24.+ teljes: 1995/I. pp. 374-379.	3
2.	Baranyai László, Firtha Ferenc (1997) Gabonaszemek szín- és alakjellemzőinek összehasonlítása számítógépes látórendszer felhasználásával (Comparison of shape and colour attributes of grains by machine vision system) - MTA Agrár-Műszaki Bizottság: Kutatási és fejlesztési tanácskozás, Gödöllő, poster:no140 + abstract:p37 + teljes: 1997/II. pp. 274-278.	3

3.	Győri Ernő, Firtha Ferenc (1997) Látórendszer alkalmazása gyümölcs belső hibáinak detektálására (Application of Vision System to Detecting Internal Damage of Fruits) - Magyar Képfeldolgozók és Alakfelismerők Országos Konferenciája, Keszthely, oral + Poster:no170 + teljes: pp. 151-155.	3
4.	Firtha Ferenc (2006) Hiperspektrális képfeldolgozó mérési módszer és alkalmazásai - MTA Agrár-Műszaki Bizottság: XXX. Jubileumi Kutatási és fejlesztési tanácskozás, Gödöllő, poster:no078 + CD: II. kötet pp. 146-150.	3
5.	Firtha Ferenc, Fekete András, Kaszab Tímea, Takács Péter, Bernd Herold, Herppich Werner, Borsa Béla, Kovács László (2006) Sárgarépa száradási folyamatának elemzése hyperspektrális képfeldolgozással - MTA Agrár-Műszaki Bizottság: XXX. Jubileumi Kutatási és fejlesztési tanácskozás, Gödöllő, konferencia-kiadvány + fulltext CD: I. kötet pp. 53-59 (011)	3
6.	Kaszab Tímea, Firtha Ferenc, Fekete András, Takács, Bernd Herold, Herppich Werner, Manuela Zude, Borsa Béla, Kovács László (2007) Sárgarépa nedvességtartalmának becslése hiperspektrális képfeldolgozással - MTA Agrár-Műszaki Bizottság: XXXI. Kutatási és fejlesztési tanácskozás, Gödöllő, konferencia-kiadvány + fulltext CD: 2. kötet pp. 84-88 (P50)	3
7.	Kaszab Tímea, Firtha Ferenc, Fekete András (2008) Sárgarépa minőségi jellemzőinek mérése mechanikai és NIR eljárásokkal - MTA Agrár-Műszaki Bizottság: XXXII. Kutatási és fejlesztési tanácskozás, Gödöllő előadás, fulltext: I. kötet, pp. 96-100. (ISBN: 978-963 611 451 0ö, 978-963 611 452 7)	3
8.	Noguláné Nagy Médea, Firtha Ferenc, Baranyai László, Meretei Anikó, Jasmina Lukinac, Fekete András (2008) Kenyérbél porozitásának becslése látórendszerrel - MTA Agrár-Műszaki Bizottság: XXXII. Kutatási és fejlesztési tanácskozás, Gödöllő poster, fulltext: II. kötet, pp. 109-113. (ISBN: 978-963 611 451 0ö, 978-963 611 453 4)	3
1.2.2. Magyar nyelvű (összefoglaló)		
1.	Fekete András, Felföldi József, Firtha Ferenc, Győri Ernő (1996) Számítógépes látórendszer alkalmazása gyümölcs- és zöldségfélék minőségjellemzéséhez, MTA Agrár Műszaki Bizottsága, Kutatási és Fejlesztési Tanácskozás, Gödöllő, poster: no170 + abstract: p44 + teljes: pp. ???	1
2.	Felföldi József, Firtha Ferenc, Szepes Anett (1998) Neurális hálózatok alkalmazása körtefajták alak- és színtulajdonságainak elkülönítésére (Application of neural network for discrimination of shape and colour properties of pear cultivars) - Proc. of Lippay J. & Vas K. International Scientific Symposium, Budapest, előadás + pp. 246-247.	1

3.	Firtha Ferenc, Szedljk Ildikó, Szántainé Kőhegyi Katalin (2005) Színjellemzők mérése különböző típusú dohányfajták fermentációja során - BCE, Lippay-Ormos-Vas, Budapest, poster + abstract: pp. 254-255.	1
1.2.3. Nemzetközi konferencia (teljes)		
1.	A. Fekete, J. Felföldi, F. Firtha & E. Győri (1995) Fruit shape and colour analysis by image processing - 5th International Conference on Image Processing and its applications, Edinburgh, UK, abstract:p5 + teljes: pp. 1-7.	5
2.	A. Fekete, J. Felföldi, F. Firtha & E. Győri (1996) Computer vision for fruit and vegetable quality assessment - ASAE Annual International Meeting, Phoenix, No. 966014, pp. 1-5.	5
3.	F. Firtha (1997) Image analysis by PC – UPOV (International Union for the Protection of New Varieties of Plants), Technical Working Party on Automation and Computer Programs (OMMI), Budapest, oral + ANNEX IV. pp. 1-5.	5
4.	F. Firtha (2005) PC controlled Vision System for Measuring Colour Distribution and Transmission of Spatial Objects - Slovak Univ. Of Agriculture: "Research and Teaching of Physics" International Scientific Conference, Nitra, poster+ CD fulltext no. 53. (ISBN: 80-8069-528-8)	5
5.	F. Firtha (2006) Hyper-spectral image processing method for real-time measurement of features - EurAgEng 2006, Bonn: XVI. CIGR World Congress, oral no 872 CD fulltext no. 440119580625 (ISBN 3-18-091958-2) 6 pages VDI-Berichte , Germany, 2006, Vol 1958 (ISSN 0083-5560), pp. 625-626.	5
6.	F. Firtha, A. Fekete, T. Kaszab, P. Takács, B. Herold, W. Herppich, B. Borsa & L. Kovács (2006) Analysis of Carrot Drying by Hyperspectral Imaging - EurAgEng 2006, Bonn: XVI. CIGR World Congress, poster no 926, CD fulltext no. 440119580699 (ISBN 3-18-091958-2) 6 pages VDI-Berichte , Germany, 2006, Vol 1958 (ISSN 0083-5560), pp. 699-670.	5
7.	S. Barton & F. Firtha (2006) Generalized symmetry and rectification of 2D objects – V. International Mathematical Workshop, Technical University in Brno, pp 1-25 (ISBN 80-214-3282-9)	5
8.	T. Kaszab, F. Firtha, A. Fekete, B. Herold, H. Werner, M. Zude, B. Borsa, L. Kovács (2007) Water Content Variations in Carrot Tissue by Hyperspectral Imaging – ASABE, Biological Sensorics: Critical Technologies for Future Biosystem, Minneapolis, Minnesota, oral + fulltext (paper number: 076109) + online available (asae.frymulti.com)	5
9.	T. Kaszab, F. Firtha & A. Fekete (2007) Carrot quality assessment by hyperspectral imaging – 3th International Conference TAE 2007, Prague, Czech Rep., Oral + fulltext:	5

	pp. 208-211 (ISBN: 978-80-213-1668-3)	
1.2.4. Nemzetközi konferencia (összefoglaló)		
1.	F. Firtha (1993) Storing and handling physical data of food industrial materials on PC – Acta Alimentaria , Vol. 22 (3), p. 256.	2
2.	A. Fekete, J. Felföldi, F. Firtha & E. Györi (1995) Fruit shape and colour analysis by image processing - 5th International Conference on Image Processing and its applications, Edinburgh, UK, p.5.	2
3.	E. Györi, J. Felföldi & F. Firtha (1995) Fruit bruise assessment by image analysis - 9 th World Congress of Food Science and Technology, Budapest, Vol. II. p. 110.	2
4.	J. Felföldi, F. Firtha & E. Györi (1996) Machine vision applications to quality characterisation of food products - Acta Alimentaria (1997) Vol. 26 (3), pp. 289-290. (ISSN 0139-3006)	2
5.	F. Firtha (1998) Studying Image Processing Methods - 4 th Seminar on Energy and Environment, GATE, p. 30.	2
6.	F. Firtha (2004) Measuring colour distribution and reflectance using PC vision system and controlled stepping motor setup; Representations in different colour spaces – AgEng 2004, Leuven, Belgium, Book of Abstracts (ISBN 90-76019-258) pp. 1014-1015	2
1.3. Könyv, jegyzet		
1.3.2. Magyar nyelvű könyv, jegyzet, könyvrészlet (megkezdett ívenként)		
1.	Élelmiszerfizika példatár (1989, Kertészeti és Élelmiszeripari Egyetem, Élelmiszeripari Kar, Budapest) Társszerző	6
2.	Digitális képfeldolgozás, hiperspektrális mérési módszer - Minőség szabályozás az élelmiszeriparban (2006, BCE – Mezőgazda Kiadó, Budapest, ISBN: 963 286 307 0), 10. fejezet	6
3.	Digitális képfeldolgozás, hiperspektrális mérési módszer - Élelmiszer-biztonság és minőség III. (2007, Mezőgazda Kiadó, Budapest, ISBN: 978-963-286-386-3, 978-963-286-389-4), 3.9. fejezet	6

1.4. Hivatkozások		
1.	<p>Szepes Anett (1999) Neural Network for Image Analysis. Kertészeti és Élelmiszeripari Egy. Közleményei 1999, Vol. LVIII., pages 43-47.</p> <p>Idézet1: J. Felföldi, F. Firtha, E. Győri (1994) Számítógépes látórendszer alkalmazása színkiértékelési feladatokra gyümölcsöknél. Élelmiszerfizikai Közlemények 1994, No 58/2, pages 37-48.</p> <p>Idézet2: F. Firtha (1996): Description of my Multilayer Backpropagation Neural Network software at: http://physics2.kee.hu/ffirtha/programs/mbpn</p>	2
2.	<p>Szepes Anett (1999) Modelling of Color Changing during Storage. Hungarian Agricultural Engineering (MTA) No 12/1999, pages 33-34.</p> <p>Idézet: J. Felföldi, F. Firtha, E. Győri (1995) Colour Analysis of Fruit and Vegetables Aided by PC Based Vision System. Hungarian Agricultural Engineering (MTA) No 8/1995, pages 43-45.</p>	1
3.	<p>Mészáros Péter, Vozáry Eszter, David Funk (1999) Elektromos impedancia paraméterek változása gyümölcszárítás folyamán. Magyar Szárítási Szimposium. Nyíregyháza, 1999. szeptember 22-23.</p> <p>Idézet: E. Vozáry, P. László, F. Firtha, P. Sass (1996) Impedance measurement of apple varieties. 1995. 9th World Congr. Food Science and Technology, Budapest</p>	1
4.	<p>Szepes Anett (2000) Tomato Ripeness prediction by computer vision system. AgEng 2000, Warwick, 00-AE-009: p34-35 + CD</p> <p>Idézet: J. Felföldi, F. Firtha, E. Győri (1995) Colour analysis of fruits and vegetables aided by PC-based vision-system. Hungarian Agricultural Engineering, Gödöllő, 1995./8 p. 43-45.</p>	1
5.	<p>Szepes Anett (2000) Applications of Artificial Neural Network in the Research of Visual Parameters of Fruits and Vegetables. Hungarian Agricultural Engineering (MTA), No 13/2000, pages 71-73.</p> <p>Idézet1: Felföldi József, Firtha Ferenc, Győri Ernő (1994) Számítógépes látórendszer alkalmazása színkiértékelési feladatokra gyümölcsöknél. Élelmiszerfizikai Közlemények, 1994, No 58/2, pages 37-48.</p> <p>Idézet2: F. Firtha (1996) Description of my Multilayer Backpropagation Neural Network software at: http://physics2.kee.hu/ffirtha/programs/mbpn</p>	2
6.	<p>Daniel Guyer, Xiukun Yang (2000) Use of genetic artificial neural networks and spectral imaging for defect detection on cherries. ELSEVIER, Computers and electronics in agriculture, 29 (2000), pages 179-194.</p>	1

	<p>Idézet: A. Fekete, J. Felföldi, F. Firtha, E. Győri (1996) Computer vision for fruit and vegetable quality assessment. 1996. július 14-18., Phoenix, Arizona: ASAE Annual International Meeting, No.966014, teljes szövegű konferencia-kiadvány: p. 1-5.</p>	
7.	<p>Baranyai László (2001) Comparison of chaotic parameters of periodic signals. Hungarian Agricultural Engineering (MTA), No 14/2001, pages 43-44.</p> <p>Idézet: Firtha Ferenc (1998) Természetes objektumok (termények) alakjának leírása osztályozási, minőségellenőrzési feladatokra. 1998. szeptember 16-18., Budapest, KÉE, Vass Károly Tudományos Ülésszak, magyar-angol: p. 58-59.</p>	1
8.	<p>Mészáros Péter, Vozáry Eszter, David Funk (2003) Elektromos impedancia paraméterek változása gyümölcszárítás folyamán. 5. Magyar Szárítási Szimposium, Szeged</p> <p>Idézet: E. Vozáry, P. László, F. Firtha, P. Sass (1996). Impedance measurement of apple varieties. 1995. 9th World Congr. Food Science and Technology, Budapest</p>	1
9.	<p>PhD értekezés (magyar nyelvű nem referált), 2005, Budapesti Corvinus Egyetem</p> <p>Jung András: Spektrális információk alkalmazása a városklíma-kutatásban</p> <p>Idézet1: Baranyai László, Firtha Ferenc (1997): Gabonaszemek szín- és alakjellemzőinek összehasonlítása számítógépes látórendszer felhasználásával. MTA-AMB Kutatási és Fejlesztési Tanácskozás, Gödöllő, Elérés: http://physics2.kee.hu/default.php?id=6</p> <p>Idézet2: A. Fekete, J. Felföldi, F. Firtha, E. Győri (1996) Computer Vision for Fruit and Vegetable. Quality Assessment. ASAE Annual International Meeting, Phoenix. No. 966014, 1–5. p.</p>	2
10.	<p>András Jung, Péter Kardeván and László Tőkei (2006) Hyperspectral Technology in Vegetation Analysis. Progress in Agricultural Engineering Sciences 2, 95–117, DOI: 10.1556/Progress.2.2006.5</p> <p>Idézet1: Baranyai László, Firtha Ferenc (1997): Gabonaszemek szín- és alakjellemzőinek összehasonlítása számítógépes látórendszer felhasználásával. MTA-AMB Kutatási és Fejlesztési Tanácskozás, Gödöllő, Elérés: http://physics2.kee.hu/default.php?id=6</p> <p>Idézet2: A. Fekete, J. Felföldi, F. Firtha, E. Győri (1996) Computer Vision for Fruit and Vegetable. Quality Assessment. ASAE Annual International Meeting, Phoenix. No. 966014, 1–5. p.</p>	2

2. Szakma specifikus tudományos alkotások		
2.3. Szoftverfejlesztés (35 adatgyűjtő, -feldolgozó szoftver dokumentációja: http://physics2.kee.hu/ffirtha)		
1.	HSIP: Push-broom hiperspektrális eszköz mérési ciklusait vezérlő szoftver: kalibrálás, zajszűrés, Y-asztal szinkronizált mozgatása, mintavételezés, real-time adatredukció előfeldolgozással, hiperkocka és pszeudoképek mentése.	8
2.	ImgProc: Képfeldolgozó mérőszoftver termények és egyéb élelmiszeripari termékek vizuális paramétereinek kötegelt mérésére: kalibrálás, képfelvétel, szegmentálás, szín-, felület- és alak jellemzése	8
3.	FFImgPro.dll: Alapvető képfeldolgozási algoritmusok gyűjteménye: képosztály beolvasása, operátorok, szegmentálási módszerek, statisztika, alakleírás	8
4.	VfwGabX.ocx: Videó eszközt kezelő ActiveX komponens. Eszköz képét valós időben előfeldolgozza (nagyítás, tükrözés, invertálás, konverzió más szinterekbe), megjeleníti és menti a frame-et JPG/GIF/BMP formátumban. VWins: Videó eszközt kezelő statikus komponens. Eszköz képét előfeldolgozza, megjeleníti és menti BMP/PCX/ JPG/GIF/... formátumban	8
5.	Circle: Kenyér porozitásának látórendszeres leírására (3 módszerem implementálása: Hough, Fourier, küszöbölés)	8
6.	Polar: Képet a középpont és a befoglaló téglalap egérrel történő kijelölése után polárkoordinátákra transzformál (alma ráncosodásának leírására).	8
7.	Reflection: RGB jel beesési és visszaverődési szögtől való függésének mérését vezérlő felület. A kétváltozós függvény szögeit automatikusan, léptetőmotorral állítja be, a szögfüggő vizsgált tartományt képfeldolgozó algoritmus választja ki.	8
8.	Target: Mozgóképen megadott színre vagy színezetre kereső, arra léptetőmotorral kamerát pozicionáló algoritmusom automatizálási feladatokra.	8
9.	Awatch: Mozgás-figyelés automatizálási feladatokra, események rögzítése BMP és AVI fájlba Logitech QuickCam VC via USB web-kamera segítségével	8
10.	Stat, Stat2: DOS és DPMI32 módú képfeldolgozó programok: szegmentálás, színstatisztika, alakleírás Fourier transzformációval. 1998-ig, a 32-bites változat fejlesztéséig volt a kutatások meghatározó alapszoftvere.	8
11.	Cluster: DOS és DPMI32 adatelemző algoritmus. Tanulómintás klaszter-analízis eljárást implementál RGB képre vagy fájlban tárolt N-dimenziós adatsorra.	8
12.	FFVesa.LIB: DOS eszközkézelés (EMS, virtuális memória, VESA grafika, kbd, egér, soros-, lpt portok, hangkártya), filekezelés (Ini, képfájlok), 3D-motor, numerikus analízis,	8

	statisztikai, stb. alaprutinok könyvtára	
13	VesaInfo, ShowBmp, ShowGif, ShowPcx: DOS segédprogramok a monitor-csatoló VESA grafikus információinak listázására, valamint Bitmap, Gif és Pcx állományok megjelenítésére	8
14	FixWin, Rgb2Pal, BlueBox, Flip: Képfájlok meghatározott ablakának mentése. - Képsorozat optimális palettájának kiválasztása klaszter-analízissel, színkonverzió - Palettás képek háttérének hisztogrammos szegmentálása, beállítása adott értékre - Képek tükrözése, forgatása az alakleíró operátorok invarianciájának vizsgálatára	8
15	Hagyma; Tanszek, Rubik, Kamera; Fuggveny: DOS 3D szimulációs szoftverek: - Hagyma 15 skalárral leírt alakjának 3D rekonstrukciója a módszer illusztrálására - Assembly nyelvű 3D motorom alkalmazásai demonstrációs, oktatási célokra - 2-változós függvények N paraméterének valós idejű állítása, fv. térbeli ábrázolása	8
16	FnGraph: Egy-változós függvény N paraméterének valós idejű állítása, fv. 2D ábrázolása	8
17	DEBI: N-dimenziós adatsor közelítése adott folytonosnak feltételezett N-változós skalár függvénnyel az MSE lokális minimumának keresésével	8
18	MBPN: Neuronháló (Multilayer Backpropagation Neural Network) alkalmazása N dimenziós adatsorra. Tanulóminták alapján számolt súlyok, majd ellenőrzés másik adatsorra	8
19	Cell: Véges-elem reológiai modell elasztikus,viszkózus,tehetetlen anyag (E, η, ρ) viselkedésének leírására adott perem-feszültség vagy perem-deformáció esetére (lineáris / nem-lineáris modellek). Real-time grafikus kijelzés.	8
20	FileFFT: Fast Fourier transzformáció alkalmazása skalár- vagy komplex adatsorra. Interpolálás, ablak-függvény illesztése után FFT kirajzolása, mentése.	8
21	LptMonitor: LPT port vezérlő csatornáinak eseményeit figyelő program. Az eseményt fájlba rögzíti, LPT kimeneteken vezérelhet (C és Assembly verziókban)	8
22	PCL 818: PCL 818 mérőkártya felprogramozása (+ interface rutinok): trigger várakozás után adatsort rögzít, FFT-t számol	8
23	DigaData for DOS / WIN32: PC 8582 mérőkártya (16 csatorna, 14 bit) adatainak beolvasása soros portról	8
24	SB scope: Példa Sound Bluster kártya DOS alatti programozására: real-time FFT (kotta rajzolása), hangkártya felhasználása mérőkártyaként	8
25	Scope: Win32 Mérőprogram. Hang adatokra végzi el a Fourier transzformációt, majd a módosított FFT-t transzformálja vissza a hang-kimeneti eszközre Resonance: Reológiai tulajdonságok mérésére a terményt növekvő frekvenciával gerjeszti,	8

	<p>majd menti a gerjesztő- és a válasz spektrumokat (FFT).</p> <p>Acquire: Hangkártya alkalmazása mérőkártyaként: Modulált dinamikus jel kalibrálása, majd mérés közben zajszűrés FFT-vel, kijelzés és loggolás.</p>	
3. K+F pályázat		
3.2. Elnyert hazai tudományos és K+F pályázatok, kutatási megbízások (nem témavezető) résztvevője		
1.	OTKA F 016214, 1995 – 1997: Gyümölcs mesterséges deformációjának és a deformáció okozta roncsolódásának összefüggései	1
2.	OTKA T 037-870, 2002 – 2004: Gyümölcs optikai és minőségi jellemzőinek modellezése	1
3.	OTKA T 048-957, 2005-2007: Tárolás során fellépő gyümölcs minőség változások modellezése	1
3.4. Elnyert külföldi vagy nemzetközi tudományos és K+F pályázatok, kutatási megbízások (nem témavezető) résztvevője		
1.	OTKA IN 64320, 2006-2007: Simulation of changes of fruit quality during storage	3