



TDK dolgozat

CCD Szkenner Mérési Adatainak Kiértékelése



Készítette: Nagy Zoltán
2012.

Tartalom

1. Bevezetés.....	3
2. Mátrix detektorok fajtái, működésük	5
2.1. A CCD definíciója.....	5
2.2. A CCD működése.....	5
2.2.1. Töltésgenerálás	6
2.2.2. Töltésgyűjtés	7
2.2.3. Töltésszállítás.....	10
2.2.4. Töltésmérés	12
2.3. Következtetések	13
3. A berendezés felépítése	14
3.1. A mechanikai felépítés	15
3.2. A fókuszáló optika	15
3.3 A fényerőszabályzó elektronika rövid bemutatása.....	17
3.5. A transzlátorvezérlők rövid bemutatása	17
4. A kiértékelés elve	19
4.1. A mérési folyamat	19
4.2. Az adatok kiértékelése.....	19
4.2.1. Az egyes pixelek világosságértékei a transzlátorpozíciók függvényében.....	20
4.2.2. Az egyes transzlátorpozíciókban a detektor válaszai	20
4.2.3. Kombinált megjelenítési módszer	20
4.2.4. A képek feldolgozása	21
5. A szoftver	22
5.1. A főablak és menürendszer	24
5.2. A fő dialógusablak	30
5. 3. A kiértékelés felhasználói felülete és működése	30
5.3.3. Image Converting	31
5.3.4. Scan Data	31
6. Elvégzett tesztmérések, példák az eredményekre	34

6.1. Elkészült grafikonok megjelenítése	34
6.1.1. Az egyes pixelek világosságértékei a transzlátorpozíciók függvényében.....	35
6.1.2. Az egyes transzlátorpozíciókban a detektor válaszai	36
6.1.3. Kombinált megjelenítési módszer	37
7. Jövőbeli fejlesztések.....	40
8. Összefoglalás.....	42
Felhasznált irodalom	43
Képek jegyzéke	44

1. Bevezetés

A CCD detektorok többrétegű félvezetőelemek, szerkezetük függ a konstrukciótól, és a gyártás technológiától, továbbá könnyen előfordulhatnak gyártási, szállítási, használati, stb. hibák is, így kijelenthető, hogy a felület pontos mikrostruktúrája ismeretlen. Ez természetesen a detektor által készített képekre is kihat, egyes pixelek sötétebbek lehetnek, mint amit az érzékelt tárgy, illetve a megvilágítás indokolna, így a képminőség jelentősen romolhat. A MOGI tanszéken a Max Planck Institute for Solar System Research részére készült két speciális berendezés az űrszondákban alkalmazott CCD detektorok vizsgálatára.

A fejlesztett CCD szkennerek célja a mátrix detektorok felületének pixelméret alatti elemzése, illetve ennek segítségével a detektor által készített kép javítása.

A fejlesztés a tanszéken egy több éve futó projekt, amikor belekerültem, az első konstrukció, illetve a szoftver egy korai verziója már létezett. A felépítés lényegében azóta sem változott, mindössze további elemekkel egészült ki, illetve precízebb, jobb minőségű eszközök vették át a régiek helyét. Az alapvető konstrukció és cél a következő:

Három darab lineáris transzlátor egy pontszerűnek tekinthető fényforrást mozgat a transzlátorok iránya által meghatározott derékszögű térbeli koordinátarendszerben, mikronnál kisebb lépéstávolságokkal. A fényforrás képe egy leképző optika segítségével a vizsgált detektor felületére képződik le. A transzlátorok egy szkennelő eljárás keretében több magasságban végigpásztazzák a detektor felületét, miközben lépésenként kép készül. Ideális esetben a folt egy képpontnál kisebb, így a készült képekből a pixel alatti struktúrára jellemző információ nyerhető ki. Ennek érdekében fontos a lehető legelőnyösebb alaphelyzet megtalálása, vagyis fókusz távolság pontos beállítása.

Feladatom, és dolgozatom tulajdonképpeni témája ennek megvalósítása, vagyis a szoftver tökéletesítése, a hiányzó funkciók elkészítése, illetve az újonnan beépített eszközök vezérlésének integrálása.

Mint említettem a berendezésből két példány készült. Az egyik a D épület optomechatronikai laboratóriumában található meg, és léptetőmotoros megoldást alkalmaz (ez az eredeti konstrukció, amely ugyanakkor több változáson is átment), a másik – jóval finomabb lépésközzel rendelkező, DC motoros vezérléssel működő – példány a Max Planck for Solar System Research katlenburg-lindau központjában működik. Dolgozatomban a léptetőmotoros

eszközzel foglalkozom részletesen, a DC motoros példányra vonatkozó egy-egy jellemző csak említésszerűen fog megjelenni. Lássuk tehát a szakdolgozat felépítését, a főbb részek rövid összefoglalását!¹

Dolgozatomban először röviden bemutatom mátrix detektorok, pontosabban a töltés-csatolt eszközök működését és felépítését, ezen keresztül pedig megindokolom a berendezés szükségességét, és rámutatok, milyen előnyökkel rendelkezik a hagyományos kalibrációs eljárásokhoz képest. Azért csak a töltéscsatolt eszközökre térek ki, mert tudományos, főképp pedig űrkutatási célokra a CCD-t alacsony zajszintjei miatt továbbra is előnyben részesítik a dinamikusan fejlődő CMOS detektorokhoz képest.

Miután tisztáztam a működést és a fejlesztendő műszer célját, rátérek a jelenleg beépített mechanikai, optikai és elektronikai részegységek bemutatására, és az azok közötti kapcsolatok taglalására. Az elektronika bemutatásánál mindössze áttekintő képet adok, nem adok közre részletes elemzést.

A negyedik részben bemutatom a kimenő adatok feldolgozásának jelenlegi folyamatát, azon elveket, melyek alapján a szkennelés során kapott kimenetekből értékelhető információt hozunk létre.

Dolgozatom ötödik része az eszköz pozicionáló/feldolgozó szoftverének bemutatása, különös tekintettel a szkennelési eljárásra, illetve az adatok kezelésére. Itt rövid áttekintést adok a szoftver működéséről, mellőzve a programnyelvvel kapcsolatos problémákat, inkább a felhasználói felületre és az adatfeldolgozásra koncentrálva.

A hatodik rész a jelenlegi eszközökkel elvégzett méréseket mutatja be, illetve az ezekből elkészített diagramokra ad példát. Rámutat továbbá, hogy ezen eljárások az elvégzett mérések során szerzett tapasztalatok alapján hogyan gyorsíthatók, tökéletesíthetők.

A hetedik rész azzal foglalkozik, hogy a dolgozat a beadás időpontjában milyen képességekkel rendelkezik, a lehetséges, illetve tervezett jövőbeni fejlesztéseket mutatja be, illetve előrevetíti a későbbi felhasználási lehetőségeket.

A nyolcadik, utolsó részben összefoglalást nyújtok a dolgozatról, különös tekintettel a TDK dolgozatok pontozási szempontjaira.

¹ Nagy Zoltán, *CCD Szkenner fejlesztése* (2010).

Link:http://www.gpk.bme.hu/index.php?option=com_content&view=article&catid=44%3Atdk-2010&id=262%3Accd-szkenner-fejlesztese&Itemid=1

2. Mátrix detektorok fajtái, működésük

2.1. A CCD definíciója

„A CCD (Charge-Coupled Device) egy elektronikai eszköz, melyet képek készítésére, adattárolásra, illetve elektromos töltés szállítására használhatunk. Bemenete lehet optikai (fény), vagy elektromos (töltés), melyet a CCD elektromos jellé alakít. A kimenetet ezután valamilyen egyéb eszköz vagy/és szoftver képpé, vagy a felhasználó számára egyéb hasznos információvá alakítja.”²

A következőkben elsősorban a CCD képkészítési funkciójával foglalkozom, mivel a kitűzött cél ehhez a témakörhöz kapcsolódik.

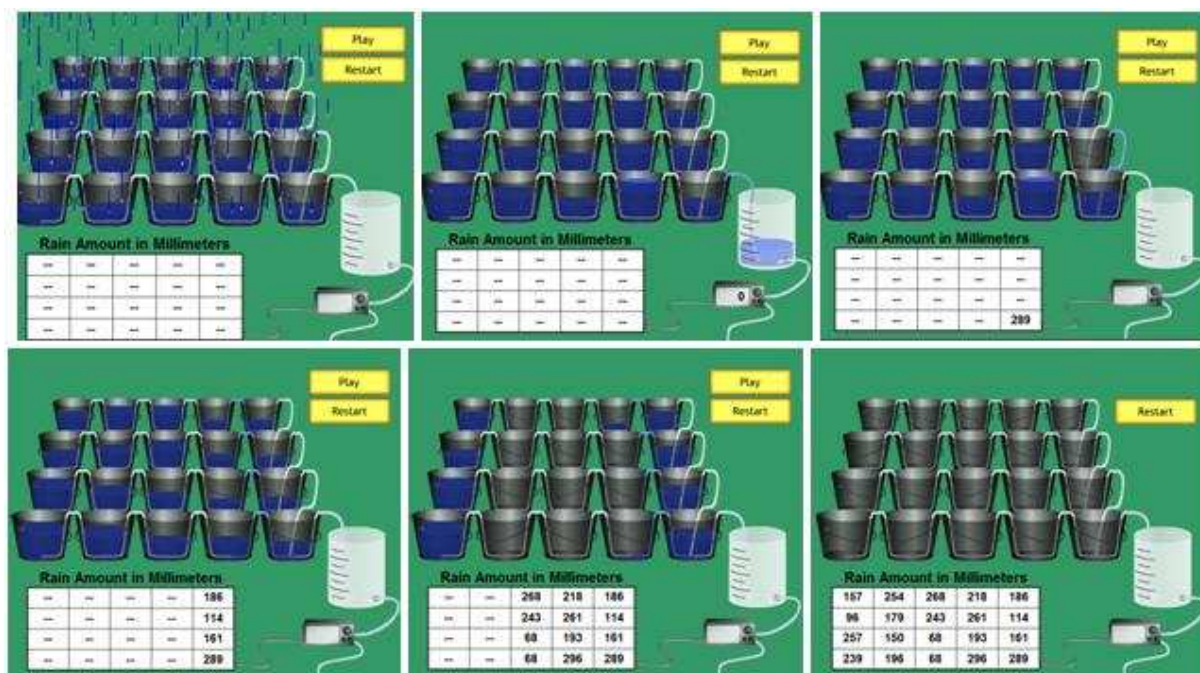
2.2. A CCD működése

A CCD eredeti célja, hogy memóriaegységként funkcionáljon, a mágneses buborékmemória elektromos analógiájaként. A CCD esetében az egységnyi információt egy MOS félvezető egység által tárolt töltéscsomag reprezentálja, mely töltéscsomag képes a töltéscsatolás eljárásának segítségével a MOS elemben tárolt információt átjuttatni a szomszédos elemre, az utolsó elemre eljutva pedig a töltés mérhető, tehát az információ kiolvasható.

A folyamatnak igen elegáns leírása a Jerome Kristian és Morle Blouke által bevezetett „vödör analógia”. Ennek lényege, hogy CCD által detektálandó képet egy területen leeső esővel modellezzük, ahol arra vagyunk kíváncsiak, hogy ezen a területen milyen eloszlásban esett az eső. Ennek érdekében egymás mellett egy mátrixban vödröket helyezünk el, amelybe beleeshet az esővíz. Az eső elálltával a mérés úgy történik, hogy az utolsó vödörben megmérjük a víz térfogatát (átöntjük egy mérőedénybe), majd az utolsó előtti vödör tartalmát beleöntjük az utolsóba, és újra térfogatot mérünk. Ily módon a vizet vödörrel vödörre, egyre távolabbról szállítva, egy mérőeszközzel megmérhető az összes leesett víztérfogat anélkül, hogy a vödrök helyét megváltoztatnánk.

² Courtney Peterson, „How it works: The Charged-Coupled Device, or CCD” Journal of Young Investigators Volume Three, Issue 1 (2001. március)

Link: <http://www.jyi.org/volumes/volume3/issue1/features/peterson.html>



1. ábra – A vödör analógia

Látható, hogy a CCD-nek tulajdonképpen négy alapvető feladatot kell ellátnia a kép létrehozásához. Ezek a következők (a „vödör analógiával” illusztrálva):

- töltésgenerálás (esőcseppek elfogása)
- töltésgyűjtés (a teljes esőzés alatt leesett esőcseppek minél hatékonyabb összegyűjtése)
- töltésszállítás (vödrök közötti átöntözés folyamata)
- töltésmérés (a víz térfogatának megmérése)³

A következőkben megvizsgálom, hogy ezen feladatokat milyen módokon hajtja végre a detektor, illetve, hogy milyen veszteségekkel számolhatunk ezek elvégzése során.

2.2.1. Töltésgenerálás

Első lépésben a fotonok elfogása és elektromos töltés generálása történik.

A töltésgenerálás a fotoelektromos hatás révén megy végbe, melynek során a foton kölcsönhatásba lép a CCD szilícium testével, és szabad elektront, vagy nagyobb energia esetén szabad elektronokat generál. A beérkezett fotonok és a generált töltések arányát a kvantumhatásfokkal fejezzük ki (QE), mely megmutatja, hogy a beérkező fotonok hány

³ James R. Janesick, Charge-Coupled Devices. (The Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2001): 22-35

százaléka hoz létre hasznos töltést. Ezen fotonokat kölcsönható fotonoknak nevezzük. Ideális esetben 100%-os kvantumhatásfokról beszélhetnénk bármely hullámhosszon, viszont ennek több tényező gátat szab. A továbbiakban tételezzük fel, hogy a generált töltések elektronok! (lyukak is lehetnének, de ennek analógiája tulajdonképpen azonos)

A fényelektromos hatás tulajdonságai miatt kölcsönhatás csak bizonyos energiaminimum fölött történik, tehát adott energiaszint alatt a foton áthalad a detektoron. Szilícium esetében ez 1,14 eV, ami egy 1,0868 nm hullámhosszú fotonnak felel meg. Ez azt jelenti, hogy a távoli infravörös tartományban a szilícium átlátszó, ilyen hullámhosszak detektálására nem alkalmasak a szilícium alapú CCD detektorok. A probléma megoldására készítenek CCD-ket pl. germániumból, melynek érzékenysége kitolódik távoli infravörös és a Röntgen-sugárzás irányába is, ugyanakkor ezeknél a detektoroknál különböző konstrukciós problémák merülnek fel, melyekre az intenzív hűtés kínál részleges megoldást.

A kvantumhatásfok a látható tartományban körülbelül 650 nm-nél a legjobb. Alacsonyabb hullámhosszaknál a szilíciumot eltakaró, általában szilícium-oxid struktúra egyre több foton nyel el, míg 400 nm-nél a kvantumhatásfok mindössze pár százalékra esik. A látható tartományon kívül kvantumhatásfok tovább romlik, majd 1 nm körül javulni kezd, amikor is a Röntgen-sugarak már áthaladnak az oxidrétegen. A kék és ultraibolya tartományban több teljesítményjavító eljárás is született, például a viszonylag olcsó foszforbevonat, melynek során a foszfor elnyeli az alacsonyabb hullámhosszakokat, és a CCD számára érzékelhetőbb hullámhosszakokat bocsájt ki. Ugyanakkor a kibocsájtás irányának véletlenszerűsége miatt az eljárás ezen hullámhosszakon teljesítmény, és így kvantumhatásfok-csökkenéssel jár. Sokkal hatékonyabb, ugyanakkor arányosan drágább eljárás a hátsó megvilágítású CCD, melynél a fényút megkerüli a bevonatot, és egyenesen a szilíciumrétegre jut a megvilágítás.

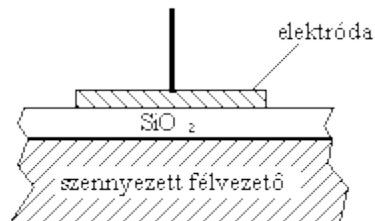
További kvantumhatásfok-csökkentő probléma a reflexió. 400 nm-en a szilíciumlap kb. 50%-át visszaveri a ráeső fénynek, amely a detektorok tükröszerű viselkedését okozza. A probléma ugyanakkor szinte teljesen orvosolható antireflexiós rétegek felvitelével. Egy megfelelő réteggel ellátott hátsó megvilágítású CCD-vel 90%-os kvantumhatásfok érhető el egyes hullámhosszakon.³

2.2.2. Töltésgyűjtés

A folyamat ismertetéséhez tekintsük a MOS tárolóegység felépítését és működését!

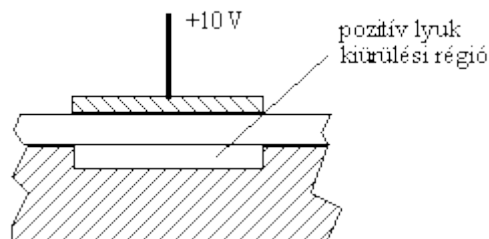
A tároló három fő részből áll:

- szennyezett félvezető alapréteg
- szigetelő zóna (általában szilícium-dioxid)
- elektróda



2. ábra – A MOS tárolóegység egyszerűsített váza

Tegyük fel, hogy P-típusúan szennyezett szilíciumkristályokról beszélünk! (léteznek N-típusúan szennyezett kristályokkal készített CCD-k, de ezek ritkábbak). A szennyezésnek köszönhetően a kristályrácsban vezetés jöhet létre, és amennyiben pozitív feszültséget kapcsolunk az elektródára, a félvezető rétegekben a Si-SiO₂ határreteg közeléből eltávolodnak a pozitív lyukak, és kialakul a pozitív lyuk kiürülési-régió.



3. ábra – A kiürülési régió

A fotoelektromos hatás során létrejött elektronok az elektromos mező hatására elválasztódnak a lyuk párjuktól, és az elektróda alatt, az úgynevezett inverziós rétegben gyülemlenek fel. Ily módon a töltések gyűjtése lehetségessé válik. A feszültség hatására ugyanakkor a kovalens kötésből az egymással ütközés hatására is szabadulnak fel elektronok, amelyek szintén

hozzáadódhatnak a felgyülemlett töltéscsomaghoz. Ezt a hatást sötétáramnak nevezzük. A CCD egy képpontja több elektródából áll, ennek a töltések szállításánál van jelentősége.⁴

A második lépésben tehát CCD feladata az, hogy pontosan reprodukálja a képinformációt a generált elektronokból. Három fő paraméter írja le ezt a folyamatot:

- A chipen lévő képpontok száma és területe;
- A képpontok kapacitása (tehát, hogy mennyi elektront képesek tárolni);
- A képpontok azon tulajdonsága, amely leírja, milyen hatásfokkal képesek összegyűjteni a generált elektronokat.

A tudományos alkalmazások többségében minél több pixelből épül fel a mátrix detektor, annál jobb. Míg a kezdetekben a detektorok igen kicsik voltak, manapság már elérhető áron lehet találkozni 16 megapixeles (16 millió pixeles) CCD-vel ellátott fényképezőgépekkel, mely felbontásban már könnyedén felveszi a versenyt egy 35 mm-es standard fényérzékeny filmmel. Tudományos célokra pedig már léteznek 100+ megapixeles detektorok, sőt, 2004-ben a sötét energia vizsgálatára a Fermilabnál 500 megapixeles kamerát is terveztek.⁵

Elméletileg a pixelek száma a végtelenségig növelhető, ugyanakkor gyártói szempontból minden képponttal nő a gyártási hiba esélye, és így a költségek nagysága. A technológia fejlődésével ugyanakkor a chipek mérete csökken, míg a felbontás nő. Szembetűnő példa, hogy míg 8 éve a mobiltelefonokba 1 megapixeles beépített CCD chip nagy áttörésnek számított, manapság 5 megapixeles felbontásról is beszélhetünk piacon kapható minikamerás alkalmazásoknál.⁶

A nagyfelbontású CCD-k nagy tárhelykapacitást is kívánnak. Példának okáért egy tudományos felhasználásban nem túl nagynak számító 16 megapixeles kamera egy képe 16 bites kódolással 32 millió byte (kb. 30,5 Mbyte) adatot jelent.

További nehézséget jelenthet a pixelszámmal növekvő kiolvasási idő is. Ez nem csak az adott idő alatt készített képek számát csökkentheti drasztikusan, de minél hosszabb ideig tart a kiolvasás, annál nagyobb a valószínűsége az információ meghibásodásának a procedura során, illetve konstrukciótól függően a detektorfelületre fény juthat a kiolvasás közben is. Ennek

⁴ Fűrész Gábor, „CCD Alapismeretek I.”, Meteor 1992/16 (1992)

⁵ Katie Yurkewicz, „Time Exposure”, Fermi News Volume 27, Number 5 (2004. május)

Link: <http://www.fnal.gov/pub/ferminews/ferminews04-05-01/p4.html>

⁶ Nyerges Tibor (szerk.), „Sharp: nagyfelbontású CCD érzékelő kamera mobilokba”, SG.hu (2003. szeptember 8.)
Link: http://www.sg.hu/cikkek/28828/sharp_nagyfelbontasu_ccd_erzekelo_kamera_

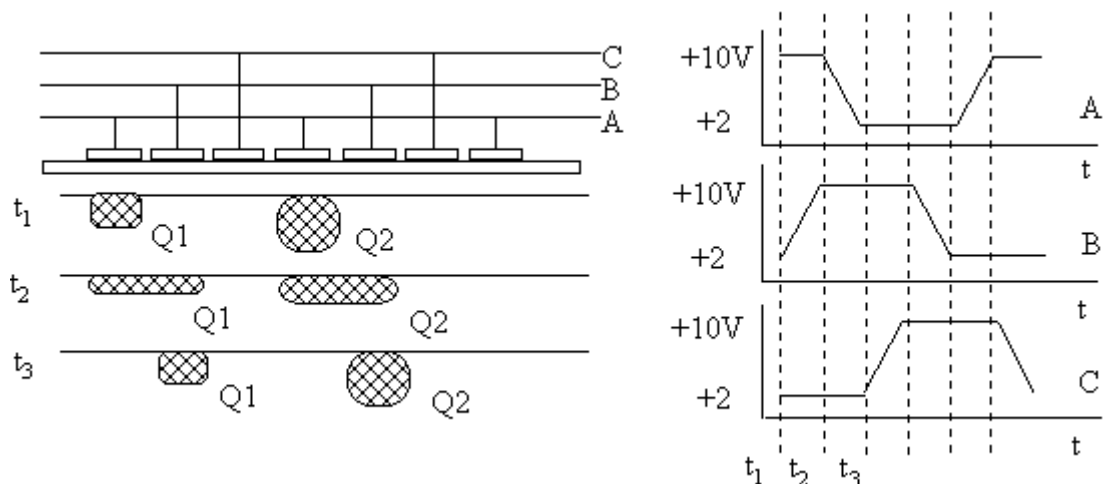
kiküszöbölésére a kiolvasás közben általában letakarják a CCD-t, illetve nagyobb felbontású detektorok esetében több kiolvasó regisztert alkalmaznak. A probléma az utóbbi megoldással az, hogy jelenősen bonyolítja az elektronikát és ily módon növeli a költségeket.

A full-well kapacitás annak mérőszáma, hogy egy képpont mennyi elektront képes megtartani, mielőtt telítődne. Minél nagyobb, annál jobb, mivel a magas full-well kapacitás jobb jel-zaj viszonytal és DNR-rel (dinamikus terjedelemmel) jár. A DNR a legfényesebb és legsötétebb még megkülönböztethető objektum viszonya a képen. Nagyobb pixel nagyobb full-well kapacitással jár, ugyanakkor az árat is jelentősen növeli.

A kép minőségét ronthatja a pixelek közötti áthallások jelenléte. Ideális esetben a képpontban összegyűjtött töltés nem juthat át a szomszédos pixelekre. A potenciálgáttól távol generált elektronok bizonyos eséllyel a szomszédos képpontokba diffundálhatnak, ezzel a képet elmosódottá, defókuszálttá téve. Ennek kiküszöbölésére az elülső megvilágítású CCD-k esetén a gyártók ügyelnek a jó minőségű, tiszta szilícium kiválasztására, különösen a közel infravörös tartományokban működő detektoroknál, ahol is a fotonok mélyebben behatolnak a szerkezetbe. Hátsó megvilágítású CCD-k esetében gondos tervezéssel elkerülhető ez a probléma, az áthallások közel megszüntethetők.³

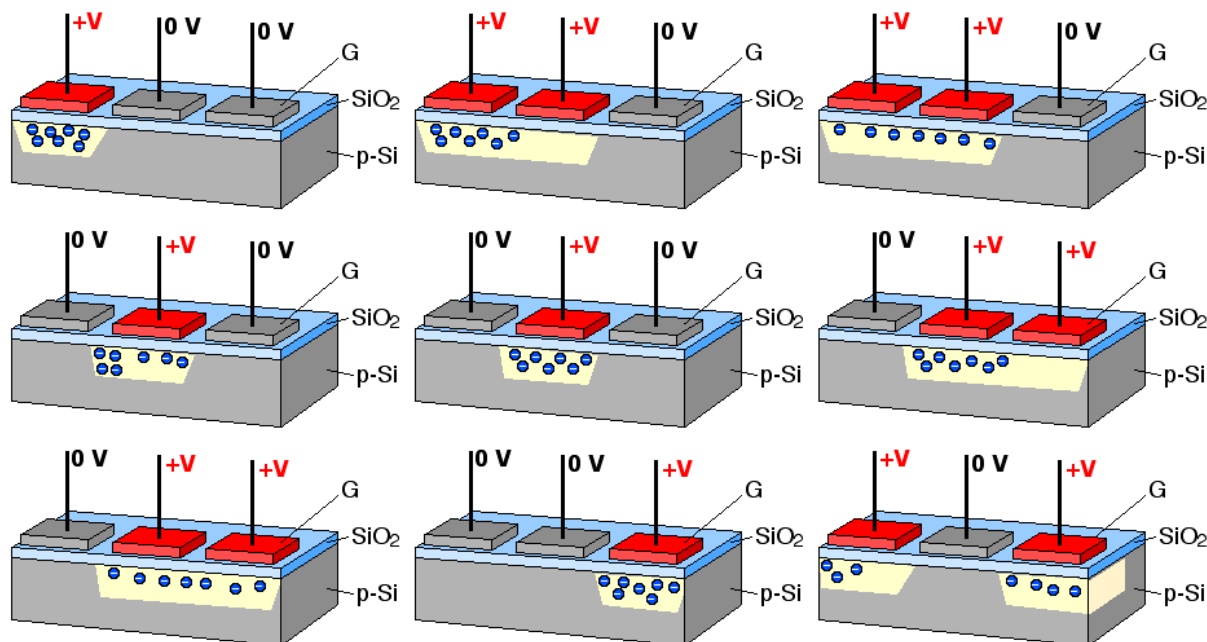
2.2.3. Töltésszállítás

A harmadik lépés, melyről a CCD a nevét is kapta, a töltés mozgatása. A képpontban tárolt elektronokat el kell juttatni a kiolvasó regiszterhez. Ennek eléréséhez a töltéscsatolás módszerét használjuk. Ez többféle elrendezéssel kivitelezhető én az első CCD-nél is használt, háromfázisú töltéscsatolás módszerét fogom bemutatni.



4. ábra – Háromfázisú töltéscsatolás

Ez esetben egy pixelen három elektróda helyezkedik el. Az expozíció során az „A” elektródán van feszültség, tehát az „A” elektróda alatt gyűlnek össze az elektronok. A kiolvasás során szabályos időközönként $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow A \rightarrow B \rightarrow \dots$ sorrendben kapcsolódnak fel, illetve le a mellékelt időtábla szerint, így mozgatva a felgyülemllett töltéseket. Az alábbi ábrásor szemléletesen mutatja az elektronok mozgását:



5. ábra – A töltések mozgása háromfázisú töltéscsatolás esetén

Kiemelt fontossággal bír, hogy minél kevesebb töltés vesszen el a szállítás során, különösen tudományos felhasználás esetén. Példaképp említeném a Hubble WF/PC II 800x800 pixeles kamerát, amely a Hubble űrteleszkópon fellövéskor helyet foglalt. A követelmény akkor

(1990-ben) az volt, hogy a töltéseknek kevesebb, mint 1%-a veszhet el a feldolgozás során, vagyis 99%-os CTE (charge transfer efficiency – töltésszállítási hatásfok) volt megengedett, tehát a 64000 pixeles kamerán lépésenként 0,16%-os hiba volt megengedhető. A modern CCD-kre azóta 99,9999% fölötti CTE jellemző, ami azt jelenti, hogy egymillió elektronból maximum egy vesz el egy átlagos szállítás közben.⁷

Töltés a szállítás során többféleképpen is elveszhet. A fentiekből látható, hogy a modern CCD-kben a töltésszállítás igen nagy hatásfokkal megoldott, már-már problémamentes. Ugyanakkor igen sok chip tartalmaz „csapdákat”, amelyek megakadályozhatják a töltések maximális hatásfok elérését. Ezek a csapdák adott mennyiségű töltést fognak el, majd azokat késleltetve bocsájtják ki, ezzel rontva a képminőséget az adott területen. Amennyiben egy ilyen csapda a kiolvasó regiszter közelében keletkezik, a képek használhatatlanná is válhatnak. Csapdák létrejöhetnek a hibás tervezés, a gyártás során, illetve a szilícium anyagában is benne lehetnek, még a gyártás előtt. Ugyanakkor a helyes anyagválasztás, illetve a precíz gyártás és tervezés, szinte teljesen képes kiküszöbölni ezt a problémát, egy mai nagyfelbontású CCD-n mindössze pár efféle hibás pixel fordul elő.

A légkörön kívül használt detektorokban a kozmikus sugárzás jelentős kárt tehet, mivel a nagy energiájú részecskék megsérthetik a kristályrácsot, és az előzőekben tárgyalt csapdákat hozhat létre. A földön ez a probléma nem áll fent, mert habár a kozmikus sugárzás is jelen van (a természetes sugárzással egyetemben), de annyira kis mértékben, hogy körülbelül 100 év kellene ahhoz, hogy az emiatt bekövetkező minőségromlás érzékelhető legyen.³

2.2.4. Töltésmérés

Az utolsó lépésben, a kiolvasáskor egy nagyon pontos referenciafeszültséggel kalibrált kondenzátorra egy töltéscsomagot léptetünk, majd annak kisülése során a mért feszültségből kivonva ezen referenciafeszültséget, analóg jelet kapunk, mely arányos a beérkezett fotonok számával. Alkalmazhatunk egybeolvasást is, mely során a kondenzátorra 2-5 töltéscsomagot léptetünk, majd ezek együttes töltésmennyiségét mérjük meg. A kiolvasó kondenzátor méretét az évek során igyekeztek minél kisebbé tenni, ezzel növelve az érzékenységet.

⁷ National Air and Space Museum Explore the Universe kiállítása, „Hubble Space Telescope Wide-Field/Planetary Camera (WF/PC).
Link: http://www.nasm.si.edu/exploretheuniverse/etu_a_wfpc.htm

A kiolvasáskor problémát jelenthet a zaj. Sokféle zajforrás léphet föl a CCD-s leképezés során, de ezek jelentős része a felhasználás alapos ismeretével jó szűrhető. A legjelentősebb, legkevésbé szűrhető zajt az elektronika okozza, melyet a tapasztalatok alapján mára jelentősen csökkentettek, de teljesen eltüntetni nem lehet.³

2.3. Következtetések

A fentiekből látható, hogy a CCD-k használata esetén igen sok zavarforrással találkozhatunk, melyeknek nagy része egyedi hiba, a gyártásra, vagy magára a detektorra jellemző. A CCD felülete továbbá a gyártást követő utóéletében (felhasználás, szállítás, stb.) is sérülhet, egyedi zavarokat létrehozva. Ezekhez járul a gyártó által kifejlesztett egyedi struktúra, melyet nem ismerhetünk, csak a bemeneti mintákra adott kimeneti válaszokat ismerjük. Ezen egyedi hibák ismeretében, illetve a struktúra vizsgálatával a detektorok teljesítménye elméletileg javítható, az általuk készített képek felbontása növelhető.

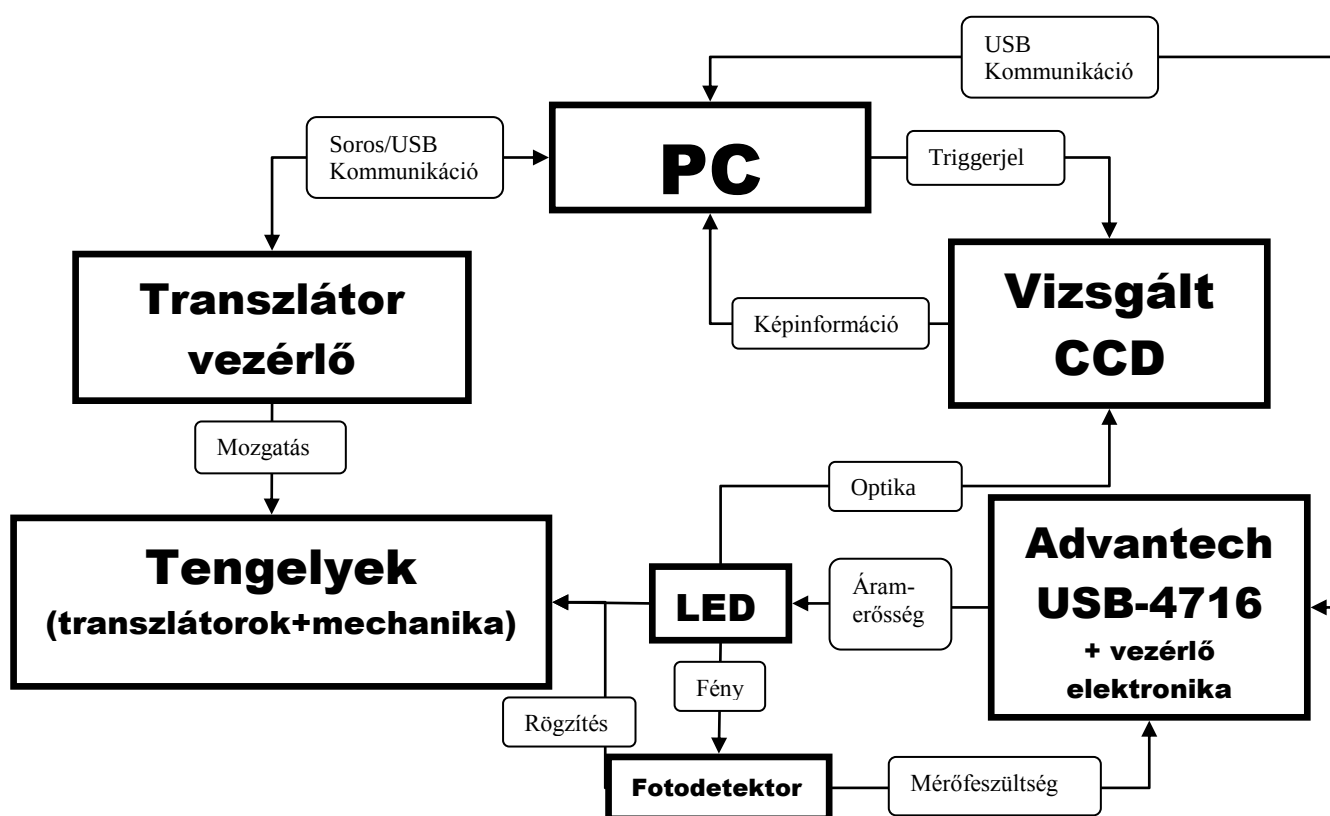
A dolgozat témáját képező CCD szkennerek egy eddig nem létező, illetve nem használt módszert vezet be a detektorok vizsgálatára, segítségével pixelenként, vagy pixel alatti méreteken elemezhető a CCD detektor teljesítménye. A módszer egyedisége abban rejlik, hogy vizsgáló nyaláb egy adott képponton fókuszálódik, más képpontokat nem talál el. Így a többi kalibrációs eljárástól eltérően nem egy kiterjedt kép elemzéséről beszélhetünk, hanem mindössze egy adott terület vizsgálatáról. Ezáltal a fentebb említett problémákat egy-egy képpontra levetítve elemezhetjük, illetve szabályosságokat fedezhetünk fel a válaszokban, mivel elméletileg a bemenő jel mindig azonos, az erre adott válasz változása pedig így releváns információkkal szolgálhat a detektor lokális tulajdonságait illetően.

3. A berendezés felépítése

A berendezés alapja egy gránittömb által stabilizált, TTT típusú - három lineáris motorból álló – soros kapcsolású robot. A transzlátorok közül a két vízszintes helyezkedik el a sorban leghátul, a végén pedig a függőleges foglal helyet. A függőleges motorhoz egy az optikát tartalmazó tubus rögzül, ez alatt helyezhető el a vizsgálandó detektor.

A tubus tartalmazza a tetején a fényforrást, illetve a fényáram mérésére szolgáló fotodetektort. Ez alatt félúton egy pinhole helyezkedik el, mint másodlagos fényforrás, legalul pedig az ezt a detektorra leképező fókuszáló optika.

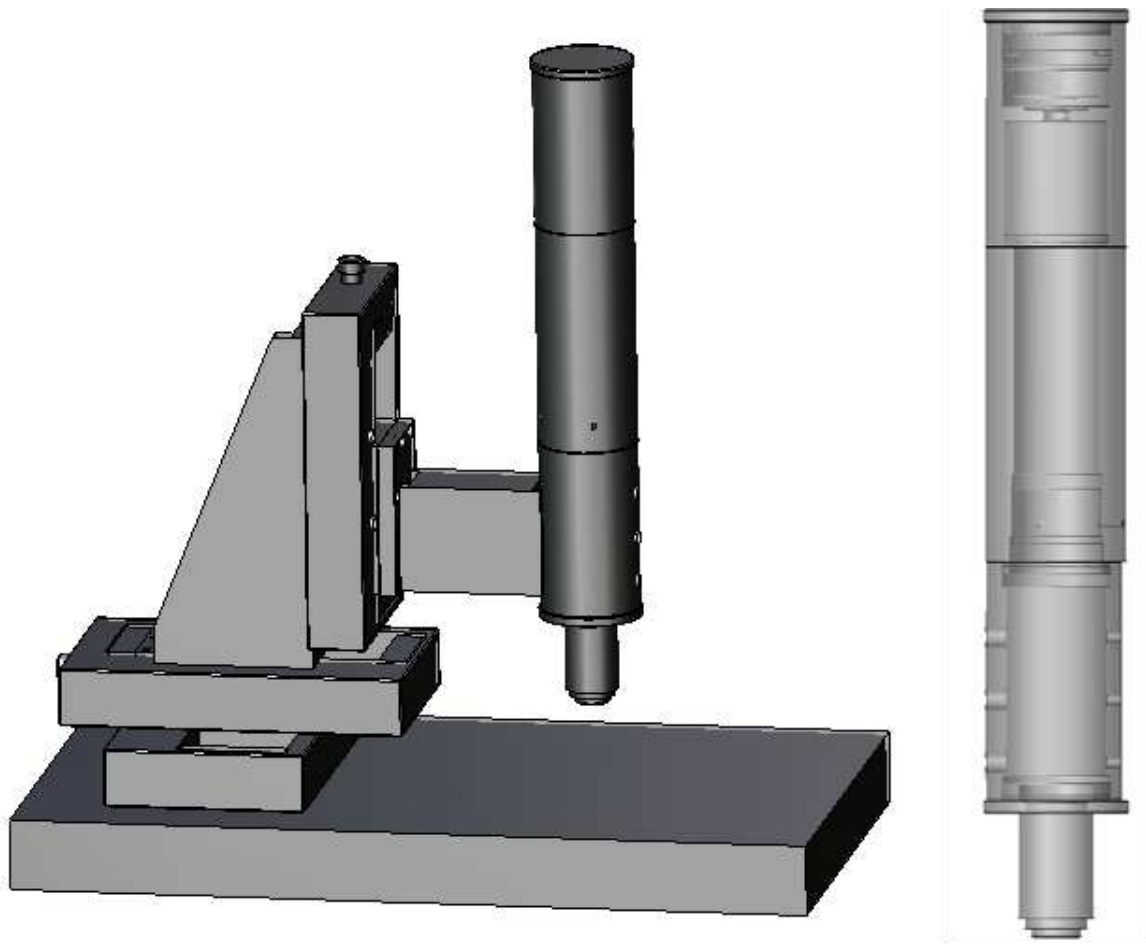
A LED-et és a fotodetektort egy Advantech USB-4716 univerzális USB modulon, illetve egy ezt magába foglaló speciális elektronikán keresztül számítógép vezérli, akárcsak a három transzlátort az ezekhez csatlakozó vezérlőegységen keresztül.



6. ábra – A berendezés kommunikációs vázlata

3.1. A mechanikai felépítés

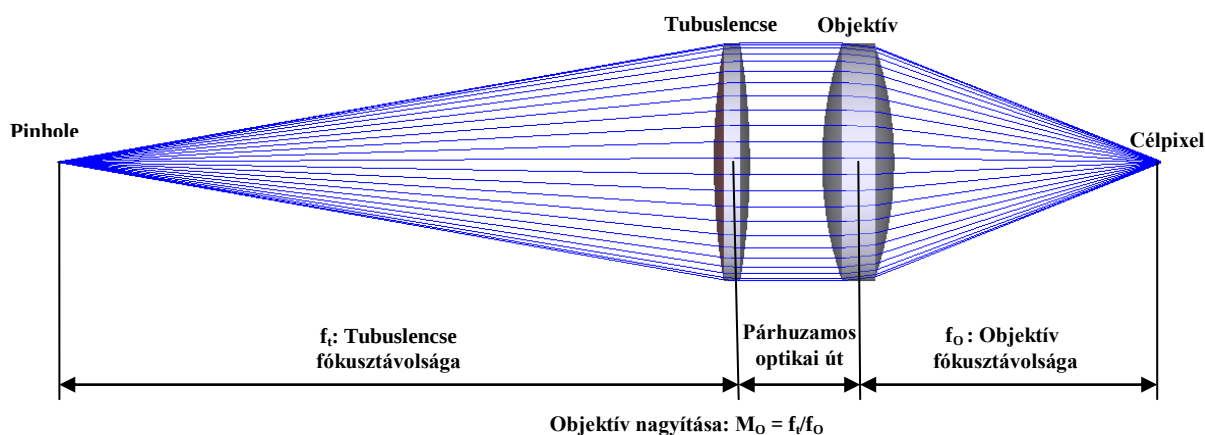
Az alábbi ábra bemutatja, hogyan valósul meg a fentebb leírt elrendezés a gyakorlatban. A nagyobb fém elemek összeszerelése csavarozással történt, az optikai elemek felfogása pedig ennek szabályai szerint különböző távtartó elemekkel.



7. ábra – A berendezés teljes 3D modellje a kötőelemek nélkül (bal oldal), kiemelve az optika felfogását az azt tartalmazó tubusban (jobb oldal)

3.2. A fókuszáló optika

Jelenleg a LED által kibocsájtott, a pinhole által rekeszelt vizsgálónyalábot egy Nikon CFI60 végtelenre korrigált objektív fókuszálja a detektorra. Az optomechatronika laborban található berendezésben jelenleg egy ötvenszeres nagyítású 4 mm fókusztávolságú példány van használatban. Az alábbi ábra az optikai utat mutatja be a pinhole-tól a detektorig.



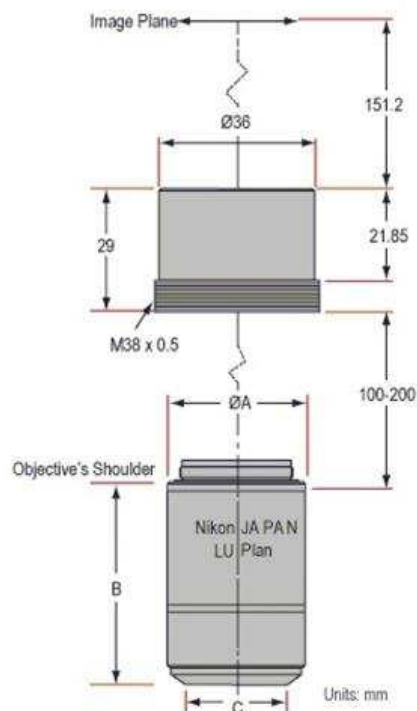
8. ábra – A fókuszáló optika sugármenete

A pinhole által rekeszelt fény tehát a tubuslencsén áthaladva kollimálódik, az objektívre párhuzamosított nyaláb jut, ez kerül fókuszálásra. A beépítési mód azt is lehetővé teszi, hogy a legjobb fókusz megtalálása után az berendezésben a felső egységet kamerára cseréljük, és a berendezést fordított optikai úttal mikroszkópként használjuk.

Nagyítás	50X
Numerikus apertúra NA	0,55
Munkatávolság (mm)	10,1
Fókusz távolság (mm)	4
Felbontás (μm)	0.5
Mélységélesség (μm)	0.91
Látómező 25 mm-es szemlencsével (mm)	0.5
Látómező 22 mm-es szemlencsével (mm)	0.44
Látómező 2/3" szennel (mm)	0.18 x 0.13
Látómező 1/2" szennel (mm)	0.13 x 0.1
Tömeg (g)	185



Nikon CFI60 Infinity-Corrected Brightfield Objectives



9. ábra – A Nikon CFI60 objektív adatai (bal fent), felépítése (jobb oldalt) és fényképe (bal lent)

3.3 A fényerőszabályzó elektronika rövid bemutatása

Mint említettem, a fényerőszabályzást egy Advantech USB-4716 univerzális USB modult használó speciális elektronika látja el. A modul kimenetei számítógépes irányítással analóg és digitális elektromos jel megjelenítésére alkalmasak, illetve bemenő analóg jel mérhető rajtuk. A speciális vezérlőelektronikán keresztül a modul által a LED fényereje szabályozható. Nagyobb léptékek átfogása érdekében a LED előtét ellenállása is váltható, így módon egy magas és egy alacsony fényerejű mód közötti kapcsolás lehetséges.

A modulhoz csatlakozik egy fotodetektor is, mellyel a LED fényárama folyamatosan mérhető, illetve a LED árama is folyamatos mérés alatt áll. A fotodetektor mérési tartománya előtét ellenállásokkal szabályozható.

A LED és a fotodetektor előtét ellenállásainak kapcsolására a digitális bemeneteket használja a berendezés. A vezérlőelektronika feladata elsősorban ezen feladat ellátása. Dolgozatomnak nem témája ezen funkció részletesebb kifejtése.



10. ábra – Az Advantech USB-4716 multifunkcionális USB modul

3.5. A transzlátorvezérlők rövid bemutatása

Jelenleg két vezérlőegységgel készült el berendezés.

A tanszéken található Legacy PI C-511 típusú léptetőmotoros vezérlést sajnálatos módon a gyártó már nem támogatja, nincsen az interneten fellelhető adatlap róla. RS-232 szabványú

soros kommunikációt támogat, a parancsokat részletesen a programozásról szóló fejezetekben fejtem ki.

A másik, a kattlenburg-lindaui Max Planck Institute for Solar System Research kutatóközpontban található példány az USB kommunikációt alkalmazó PI C-863 Mercury szervó vezérlőket alkalmaz. Ezen eszköz nagyságrendekkel pontosabb és gyorsabb, mint a tanszéken elhelyezkedő, tekintve, hogy a ma elérhető talán legjobb minőségű alkatrészek felhasználásával készült.



11. ábra – API C-863 Mercury DC szervó vezérlőegység

4. A kiértékelés elve

4.1. A mérési folyamat

Az eszközzel végzett mérés során a vizsgált detektor az optikai tubus alatt helyezkedik el, rá egy az optika által jól fókuszált közel monokromatikus nyaláb esik. A nyaláb fényerőssége a detektoron jelet vált ki, mely a mérés alapját képezi.

A szkennelés során a tubus az eszköz a saját koordináta-rendszerében mozog egy előre meghatározott, adott sűrűségű rács mentén, miközben a rácspontokban a detektorral képeket készítünk a fénynyalábról. Adott esetben ezt több magasságban is elvégezzük, a pontosabb fókuszhelyzetet biztosítandó. Így egy szkennelési folyamat végén a következő adatokkal rendelkezünk:

- A mérési pontok sorszáma
- A transzlátorkoordináták a mérési pontokban
- A LED árama a mérési pontokban
- A PD árama a mérési pontokban
- A mérési pontok időpontja
- A mérési pontokban készült képek

Ezen adatok segítségével kell a mérésekről szemléletes, a detektor válaszait jól tükröző kiértékeléseket készítenünk, lehetőleg grafikus formában.

4.2. Az adatok kiértékelése

A fenti adatok kiértékelése több problémát is felvet. A tulajdonképpeni információt a pozíció függvényében a CCD pixeleinek válasza adja, ugyanakkor mivel a pozíció kétdimenziós (feltéve, hogy egy adott magasságra készítjük el a kiértékelést), továbbá a detektor pixelkoordinátái szintén kétdimenziósak. Mivel pedig az adott pixel válaszát is meg kell jelenítenünk, ötdimenziós függvényt kapunk. Mivel három dimenzió fölött problémás az ábrázolás, szükségünk van olyan megjelenítési módszerekre, melyek információvesztés nélkül teszik lehetővé az adatok vizsgálatát maximum három dimenzióban. Az alábbiakban bemutatom az általam javasolt módszereket, melyekre a 6. fejezetben példákat is adok.

4.2.1. Az egyes pixelek világosságértékei a transzlátorpozíciók függvényében

Ezen módszer keretében a vizsgált pixeleket külön kezeljük, és minden egyes vizsgált pixelre felírjuk a világosságértékeket a két síkbeli transzlátorkoordináta függvényében. Mivel a transzlátorpozíciók csak az eszköz koordinátarendszerében pontosak, a tubus alatt elhelyezkedő detektor mérésről mérésre másutt lehet hozzájuk képest, az X-Y koordinátatengelyeken elegendő egy relatív transzlátorkoordinátát feltüntetni, a lényeges adat valójában a lépésköz.

Ez a módszer a detektor pixelszámától függő, mindenképpen nagyszámú függvényt ad, melyek közül természetesen csak a vizsgált detektorfelülethez tartozó mérések tartalmazznak eredményt. Mindemellett a felsorolt megjelenítési módok közül ezen módszerrel minősíthetők legjobban az egyes pixelek, mivel megmutatja a helyzetfüggő pixelhibákat.

4.2.2. Az egyes transzlátorpozíciókban a detektor válaszai

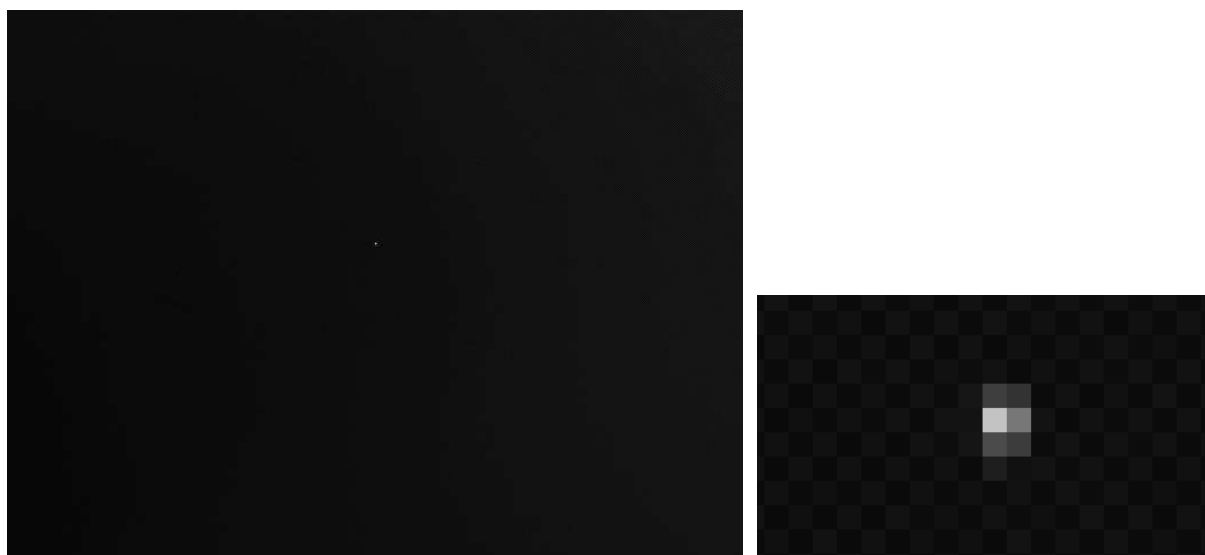
A módszer segítségével annyi függvényt kapunk, ahány mérést végeztünk a szkennelés keretében. A két sík koordinátán a detektor pixelkoordinátái foglalnak helyet, a harmadik koordináta az adott pixel válasza, a világosságérték. A módszer előnye, hogy az idő, mint negyedik koordináta bevezetésével szemléletes mozgó diagram készíthető a detektorfelületről, melyen a képkockák az egyes mérési pontokban készített függvényábrázolások a lépések sorrendjében.

4.2.3. Kombinált megjelenítési módszer

Amennyiben a mérési pontok koordinátái helyett a mérés sorszámát helyezzük az egyik sík tengelyre, a másikra pedig a vizsgált területen a pixel mátrixbeli sorszámát (az alsó sarokpontot 0-nak tekintve), a maradék, Z tengelyre pedig az adott pixel adott mérési pontban mért világosságérték válaszát, a teljes mérés megjeleníthető egyetlen diagramon. Habár ez a módszer nem ad szemléletes képet a mérés eredményeiről, segíthet az előzőekben tárgyalt két függvény releváns pontjainak felderítésében, tehát elkerülhető, hogy olyan kiértékeléseket készítsünk, melyeken nem látható semmilyen hasznos információ. Mivel az összes mérési adatot egyszerre tartalmazza, a későbbiekben kidolgozandó szoftveres képkorrekció alapját valószínűleg ez, vagy egy ehhez hasonló függvény fogja képezni.

4.2.4. A képek feldolgozása

Nem tettem még említést egy igen fontos problémáról, vagyis a készült képek feldolgozásáról. Egy viszonylag kis felbontású, 1 megapixeles CCD detektor által készített kép tömörítetlen formában több mint 3 Mbyte adatot jelent (pixelenként 32 bit adatot feltételezve). Egy kis területen - az egyszerűség kedvéért legyen ez 50x50-es - végzett mérés során 2500 kép készül. Ez már több mint 7 Gbyte adatot jelent, ami a mérési pontok számával fokozatosan nő. Ezen képeknek igen lassú lenne a feldolgozása, ezért, mivel egy-egy mérési pontban – tekintve, hogy a kép egy jól fókuszált nyalábról készült - alig néhány pixel tartalmaz hasznos információt, a képeket feldolgozás előtt érdemes átalakítani, és csak a valóban információt tartalmazó területtel foglalkozni. Amennyiben egy adott pixel körül kivágunk egy területet a képből, és tároljuk a kivágási középpontot és a kivágás sugarát, a feldolgozás egyszerűbb és gyorsabb lesz, mindemellett pedig a mérési pontok adatai nem sérülnek.



12. ábra – Példa egy mérés során készült képre, és a tartalmazott hasznos információra

5. A szoftver

A fejlesztendő szoftvernek a következő feladatokat kell ellátnia, illetve kritériumokat teljesítenie:

- a) Képesnek kell lennie a berendezéshez tartozó számítógépes perifériákkal kommunikálni, azokat vezérelni.
- b) Képesnek kell lennie tetszőleges fajtájú (jelenleg kétféle, de a későbbiekben egyéb típusok is szóba jöhetnek) transzlátort kezelni. Amennyiben új típus kerül bevezetésre, azt minimális erőfeszítéssel legyen integrálható.
- c) Képesnek kell lennie tetszőleges típusú CCD detektorral kommunikálni, esetleges kompatibilitási probléma esetén pedig álljon rendelkezésre kézenfekvő megoldás.
- d) Képesnek kell lennie a CCD detektorról beérkezett képet beolvasni, a képernyőn megjeleníteni, a világossági értékeket kiértékelni.
- e) Képesnek kell lennie a képet és a perifériákat párhuzamosan kezelni, tehát a képinformáció alapján a transzlátorok pozícióját megváltoztatni, illetve a LED fényerejét növelni vagy csökkenteni.
- f) A kimenő paramétereket a felhasználónak közvetlenül is meg kell tudnia változtatni, lehetővé kell tenni a kézi korrekciót.
- g) Felhasználóbarátnak kell lennie, a megszokott kezelőfelülettel kell rendelkeznie.
- h) Modulárisan bővíthetőnek kell lennie az esetleges későbbi fejlesztések miatt.

A szoftver ezen kritériumok figyelembevételével Microsoft Visual Studio 2010 fejlesztői környezetben, C++ nyelven készült a Microsoft Foundation Class Library (MFC) osztályainak segítségével, melyek egy egyszerű, áttekinthető alapot nyújtanak, ugyanakkor lehetővé teszik a mélyebb változtatásokat, így jól használhatóak műszaki szoftverek fejlesztéséhez. Ez egyszerre több kritériumra is kellemesen használható megoldást nyújt, hiszen olyan előre elkészített osztályokat kapunk, melyek némi változtatással jól megfelelnek követelményeinknek.

Az MFC osztályok megszokott, kényelmes Windowsos felületű környezetet nyújtanak, az objektumorientáltság pedig jól kielégíti a moduláris felépítés kritériumát, hiszen jó tervezéssel a kész osztályok újrahasználhatók, az újak pedig a többi megváltoztatása nélkül építhetők be a kódba.

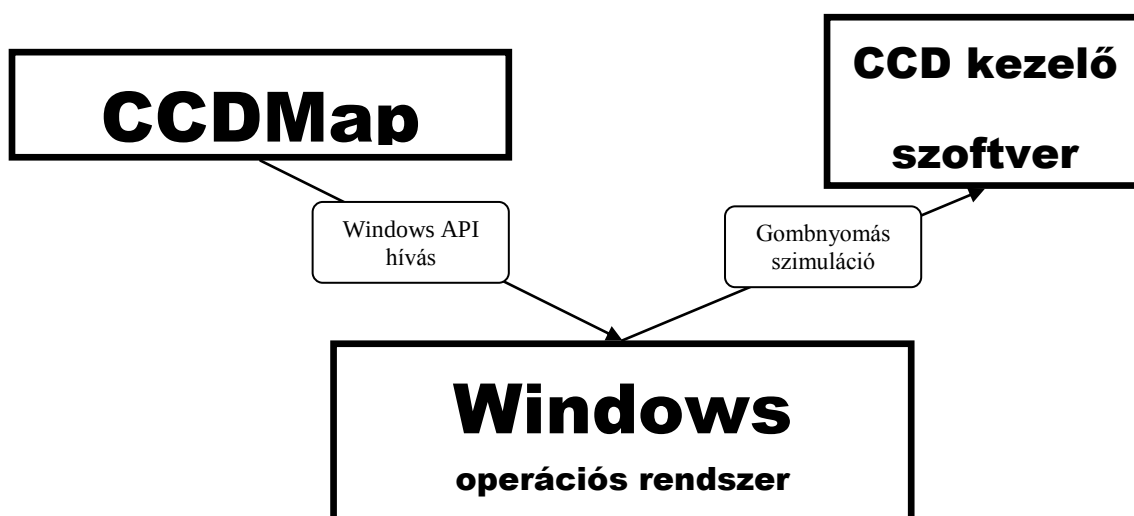
A szoftvernek konzulensem a CCDMap nevet adta, mely név jól összefoglalja annak kimenetét.

A c) és d) kritériumoknak megfelelés érdekében a közvetett kommunikáció mellett döntöttünk. Mivel ahány gyártó, annyiféle kódolás, a képeket a következő módon kapjuk el:

1. A gyártó által közreadott szoftver segítségével (gombnyomást szimulálva) képet kapunk el egy előre megadott, a szoftver által figyelt könyvtárba
2. Az figyelt könyvtárban új fájl jelenik meg
3. A szoftver beolvassa ezt a fájlt, és amennyiben ismert formátumú képfájl, értelmezi, konvertálja és megjeleníti azt.

A CCDMap szoftver jelenleg a legtöbb hétköznapiokban használt és tudományos képformátumot képes beolvasni. A feldolgozáshoz és vizsgálatához az egyszerű tisztán világossági információkat tartalmazó (tehát közvetlenül számolásra felhasználható) Celestial Image formátumot használja.

A szoftver tehát nem egyenesen a detektorral kommunikál, hanem az operációs rendszerrel, amely utasítást ad a vezérlő szoftvernek, és magát a kommunikációt ez vezérli le. (Természetesen az illesztőprogramok által itt is történik kommunikáció az operációs rendszerrel, a folyamatos futáshoz szükséges információcseréről nem is beszélve, de belátható, hogy míg ezek a folyamatok a működés elengedhetetlen kellékei, a CCDMap szoftver által használt módszer egészen más természetű.)



13. ábra – A közvetett képelkapási módszer

A szoftver a következő részekre osztható fel:

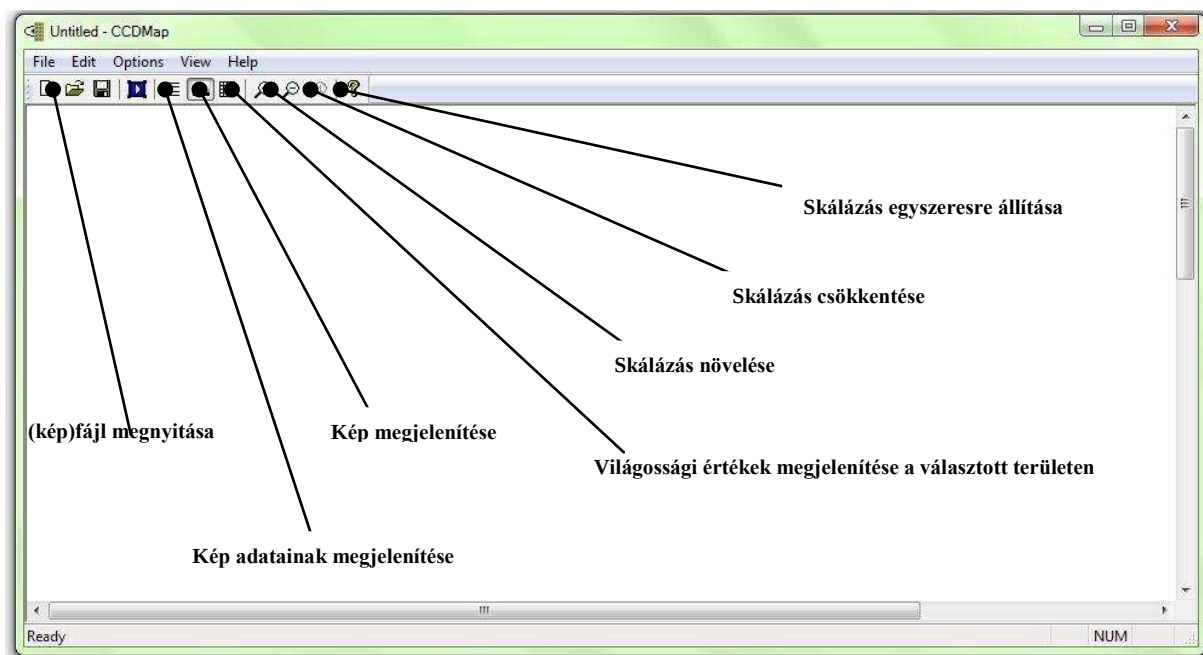
- felhasználói felület
- a felhasznált alkotóelemek működtető függvényei
- képfeldolgozó függvények, eljárások
- szabályzás, pozicionálás
- szkennelési eljárás
- méréskiértékelés

Az alábbiakban bemutatom szoftver felhasználói felületét, ezen belül pedig kitérek a szkennelési eljárásra és a méréskiértékelés gyakorlati megvalósítására. A programozási problémákat a TDK dolgozat keretein belül nem részletezem, azokat BSc-s szakdolgozatomban részletesen tárgyaltam.

5.1. A főablak és menürendszer

A főablak tetején a menürendszer található, alatta pedig a gyorselérési eszköztár. Az ablakban megjelenő adat lehet az aktuálisan elkészített kép kép, ezen kép adatai, a kép egy választott területe, a kép egy választott területének világossági értékei.

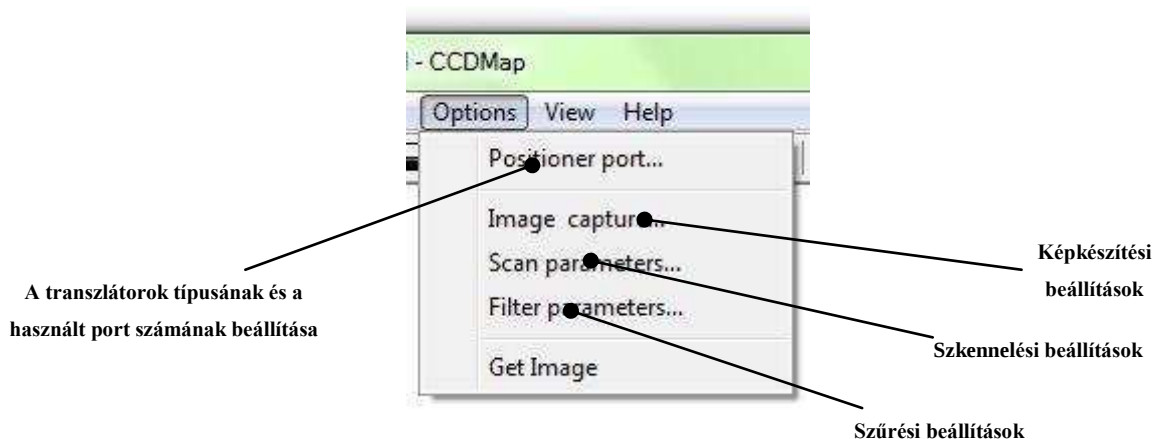
A leggyakoribb feladatok elérhetőek a gyorselérési eszköztárból. Az ablakelrendezés és a fontosabb ikonok jelentései az alábbi ábrán láthatóak.



14. ábra – A CCDMap szoftver főablaka

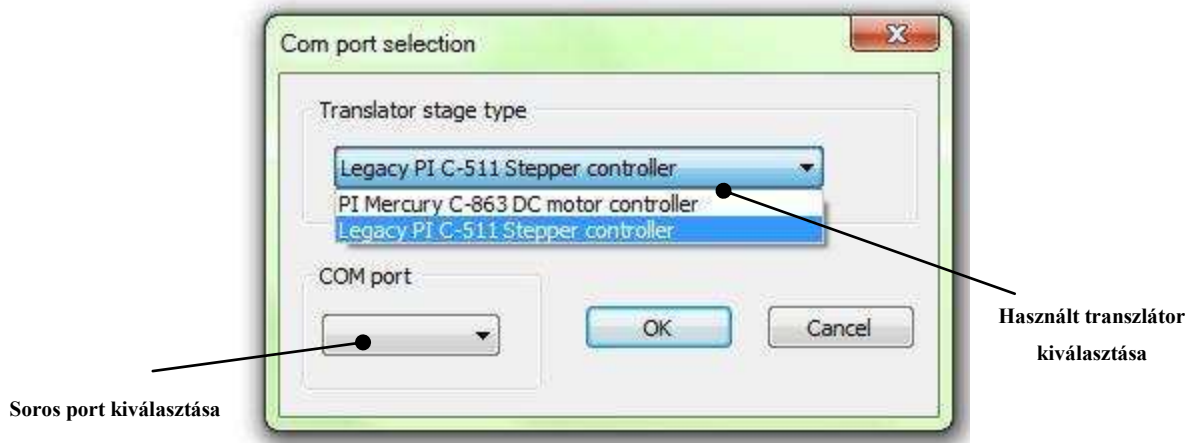
A menüsor a standard MFC szoftverek menüsorát tükrözi, fontosabb változtatások az Options és a View menüpontban történtek.

Az Options menüpontban kaptak helyet a kezelés szempontjából fontos beállítások parancsai, melyeket a használat előtt a felhasználónak kell meghatároznia. A fontosabb parancsok az alábbi ábrán láthatóak.



15. ábra – Az Options menüpont és menüparancsai

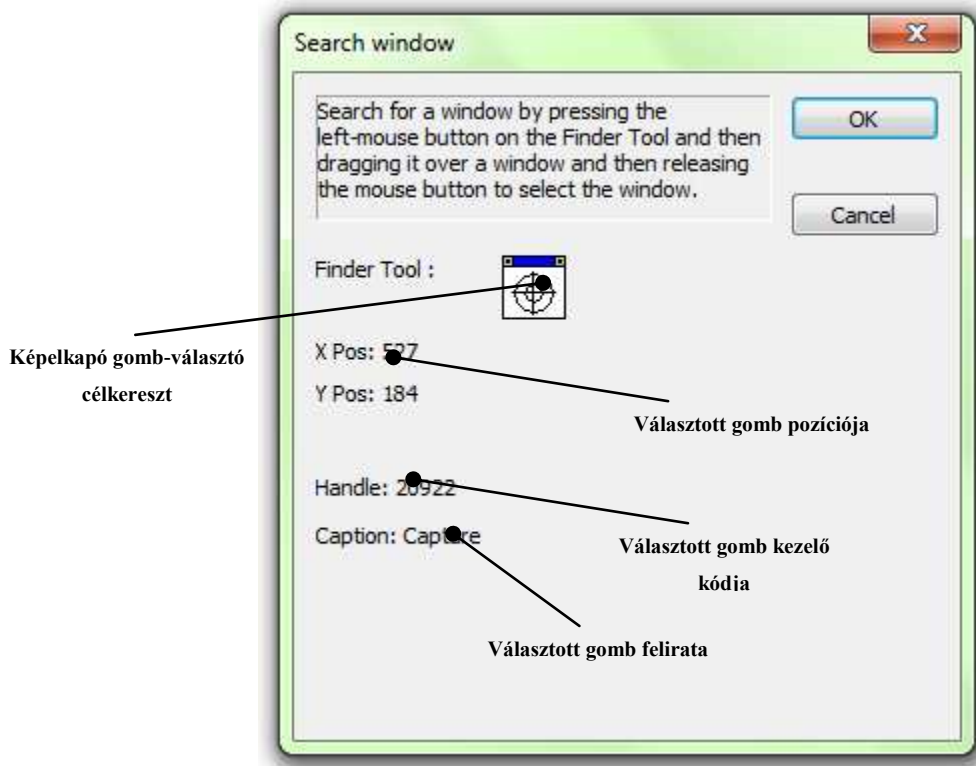
Mindegyik parancs egy saját dialógust nyit meg, melyeket az alábbi ábrák mutatnak be.



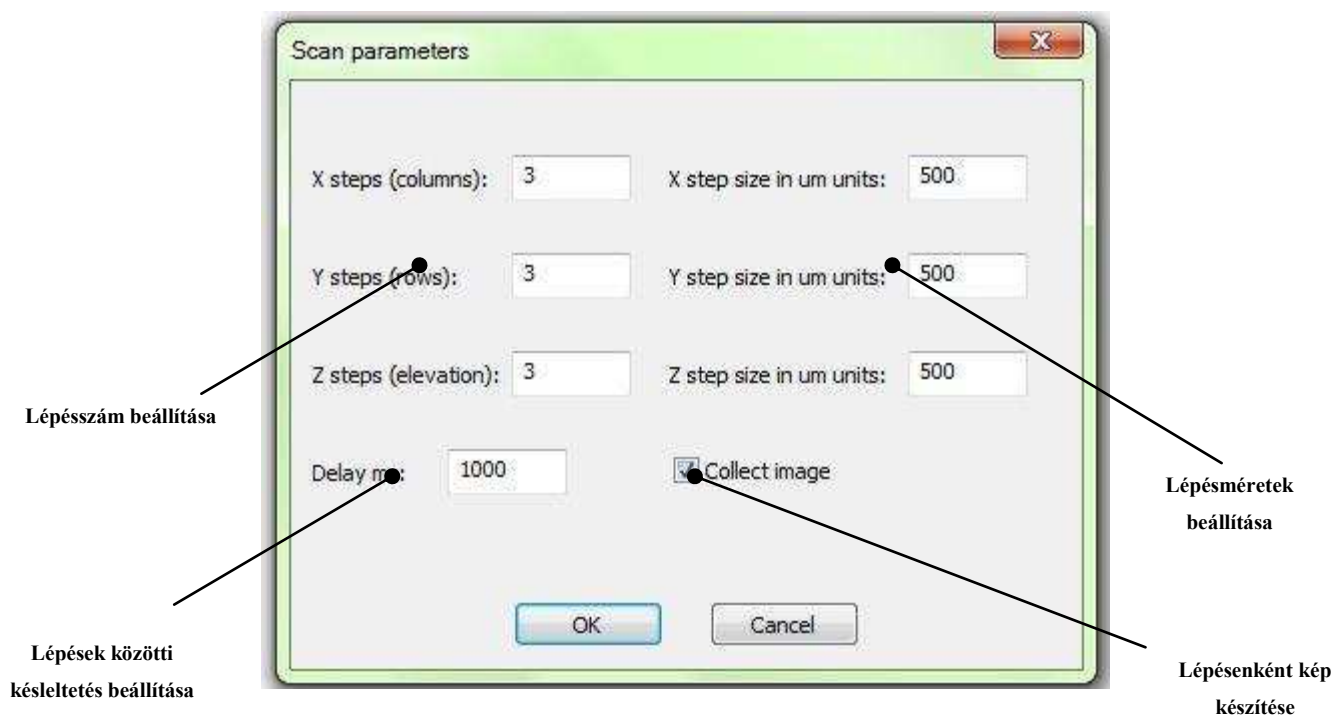
16. ábra – A transzlátorok típusának és a használt port számának beállítására használt dialógus



17. ábra – A képkészítési beállítások dialógusa



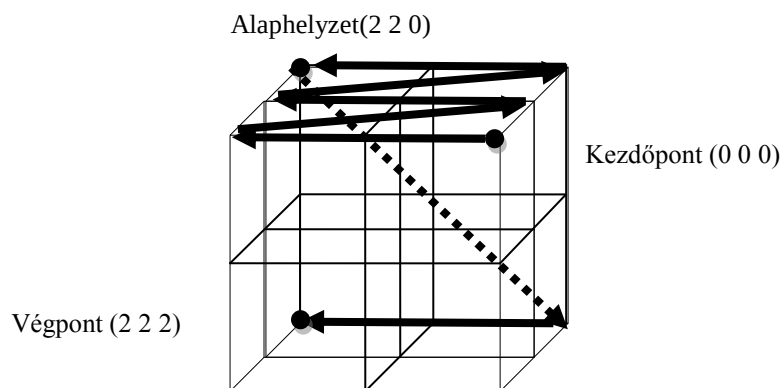
18. ábra – A közvetett képelkapási beállítások dialógusa



19. ábra – A szkennelési beállítások dialógusa

A szkennelés során az eszköz a beállítások alapján létrehoz egy X-Y-Z koordináták szerinti háromdimenziós rácsot az aktuális kezdőpontját tekintve az egyik szélső rácspontnak, majd az

ellentétes, de egy szinten lévő rácspontból elindulva minden szinten végighalad minden síkbeli rácsponton. A képkészítés opcionális, esetleges teszt szkennelések esetére.



20. ábra – A szkennelés menete

A szkennelés elején tárolásra kerül az első ponton a mátrix legfényesebb pixelének koordinátája, (a fájlnev alakja:

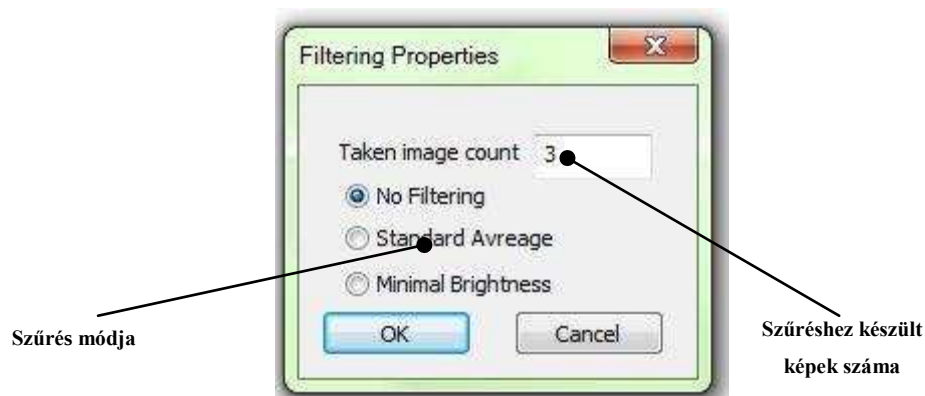
`Scan_startpoint_log_[mérésDátuma]_[mérésKezdőIdőpontja].txt)`

illetve minden lépésben mentésre kerülnek az aktuális szkennelési koordináták (az ábrán a zárójelben látható számsor), melyből visszaállítható a lépés sorszáma, a transzlátorkoordináták, a mért PD és LED áram, a mérési pont időpontja, illetve a készült kép fájlneve. Ezen adatok egy scan-log fájlba kerülnek kiírásra, melynek tipikus alakja:

`Scan_log_[mérésDátuma]_[mérésKezdőIdőpontja].txt.`

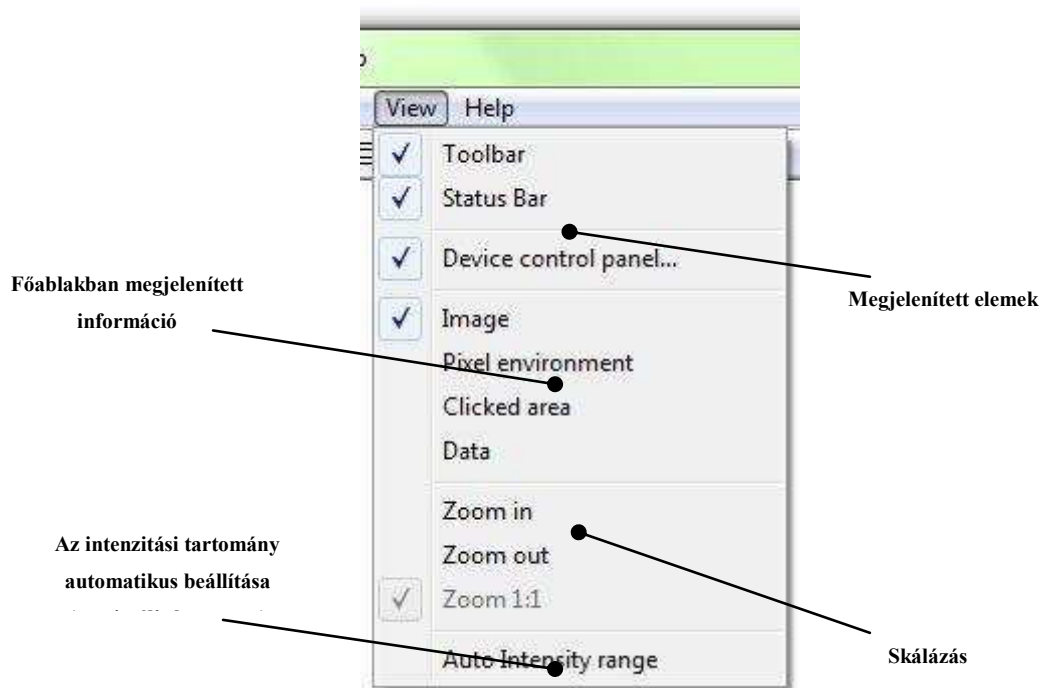
190	0	0	60.015250	59.896750	90.810250	-0.084229	0.004578	14:24:53	20111027142454409.bmp
191	0	0	60.015750	59.896750	90.810250	-0.084229	0.004171	14:24:58	20111027142500616.bmp
192	0	0	60.016250	59.896750	90.810250	-0.084839	0.002950	14:25:04	20111027142505838.bmp
193	0	0	60.016750	59.896750	90.810250	-0.085144	0.005391	14:25:09	20111027142510824.bmp
194	0	0	60.017250	59.896750	90.810250	-0.082092	0.004374	14:25:17	20111027142519661.bmp
195	0	0	60.017750	59.896750	90.810250	-0.086060	0.004171	14:25:23	20111027142524362.bmp
196	0	0	60.018250	59.896750	90.810250	-0.087891	0.002441	14:25:28	20111027142529807.bmp
197	0	0	60.018750	59.896750	90.810250	-0.084229	0.004781	14:25:33	20111027142534968.bmp
198	0	0	60.019250	59.896750	90.810250	-0.083313	0.004476	14:25:40	20111027142541902.bmp
199	0	0	60.019750	59.896750	90.810250	-0.083618	0.004069	14:25:45	20111027142547075.bmp
0	1	0	59.920000	59.897000	90.810250	-0.087891	-0.000203	14:25:56	20111027142557742.bmp
1	1	0	59.920500	59.897000	90.810250	-0.083313	0.001017	14:26:01	20111027142603891.bmp
2	1	0	59.921000	59.897000	90.810250	-0.082703	0.002340	14:26:07	20111027142609946.bmp
3	1	0	59.921500	59.897000	90.810250	-0.085449	0.002238	14:26:14	20111027142615377.bmp
4	1	0	59.922000	59.897000	90.810250	-0.084839	-0.001526	14:26:19	20111027142620644.bmp
5	1	0	59.922500	59.897000	90.810250	-0.087585	0.000916	14:26:24	20111027142625902.bmp

21. ábra – Példa a szkennelés során mentett adatok elrendezésére



22. ábra – A szűrési beállítások dialógusa

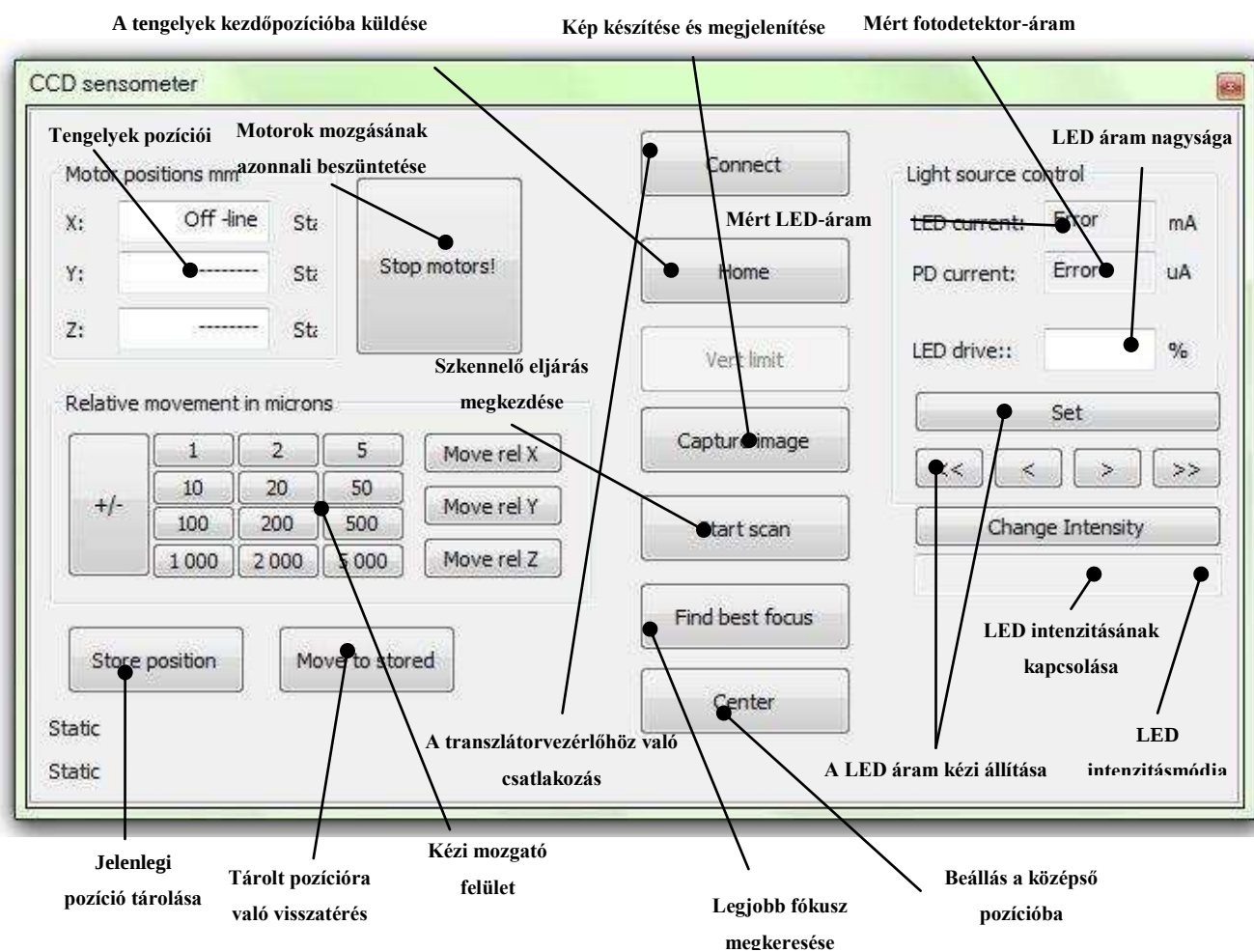
A View menüpont alatt a megjelenítési beállításokat találjuk, mely a főablakban megjelenített adatokat, a főablak felépítését, illetve a felhasználó számára kényelmi beállításokat tartalmaz.



23. ábra – A View menüpont és menüparancsai

5.2. A fő dialógusablak

A berendezés kezelése a fő dialógusablakban (Control Panel) történik. A felhasználó itt kézzel irányíthatja a berendezést, elindíthatja a szkennelő, illetve fókuszáló eljárásokat, illetve a szoftver itt tájékoztatja őt a berendezés állapotáról.



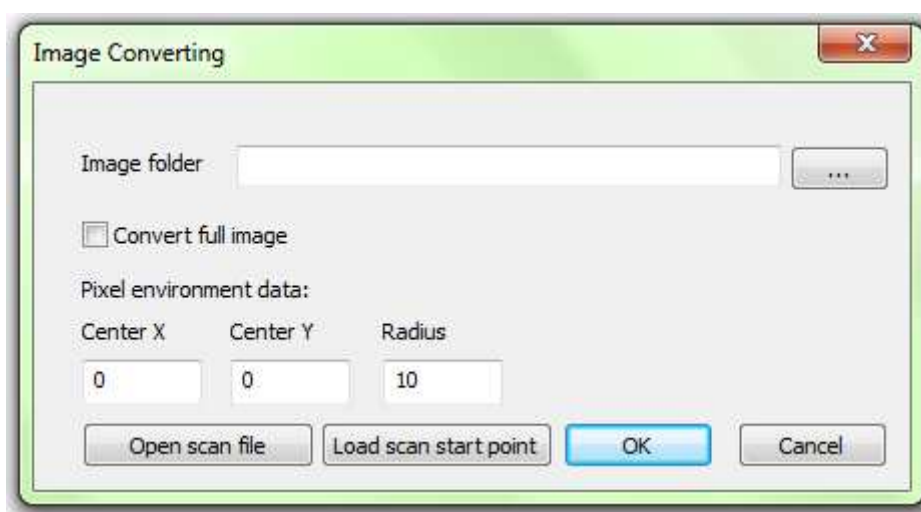
24. ábra – A CCDMap szoftver vezérlő felülete

5.3. A kiértékelés felhasználói felülete és működése

A kiértékeléshez saját menüpont tartozik a főmenüben, Data Processing felirattal, ennek két menüpontja pedig az Image Converting és a Scan Data.

5.3.3. Image Converting

Ez a menüparancs, illetve a hozzátartozó funkció egyrészt a képek megfelelő méretűre vágását, másrészt Celestial Image formátumra való konvertálását végzi. Az említett formátumot a szoftver nagyságrendekkel gyorsabban képes beolvasni és feldolgozni, mint bármelyik másikat, így habár konvertálás nélkül is elvégezhető a feldolgozás, elvégzése jelentősen lecsökkenti a szükséges számítási időt. A parancshoz tartozó dialógusablak a következőképpen néz ki:

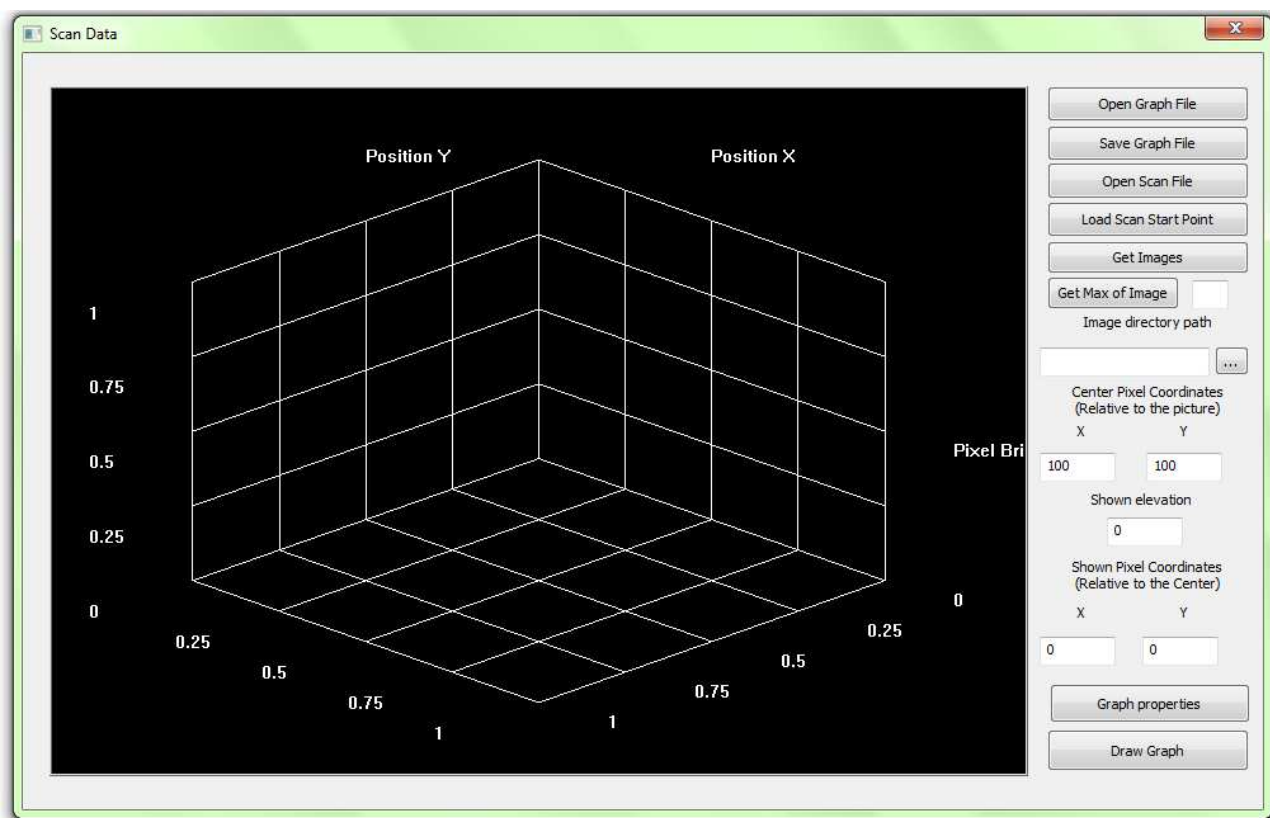


25. ábra – A képkonvertálás dialógusa

Az Image folder szerkesztődobozba beírt, vagy a mellette lévő gomb segítségével betöltött könyvtárban található képek konvertálása történik meg az OK gomb megnyomása után. A konvertálandó fájlok nevei az Open scan file gomb lenyomásával betölthető scan-log fájlból kerülnek kiolvasásra, a kivágás középpontja és sugara pedig a megfelelő szövegdobozokba írható be. A Load scan start point gomb segítségével betölthető egy mérés első pontján a legfényesebb koordináta az X-Y középpontoknak. A Convert full image bejelölésével a teljes kép konvertálásra kerül, nem történik kivágás.

5.3.4. Scan Data

Az ehhez a parancshoz tartozó dialógusablakban történik a tulajdonképpeni kiértékelés, a diagramadatok létrehozása.



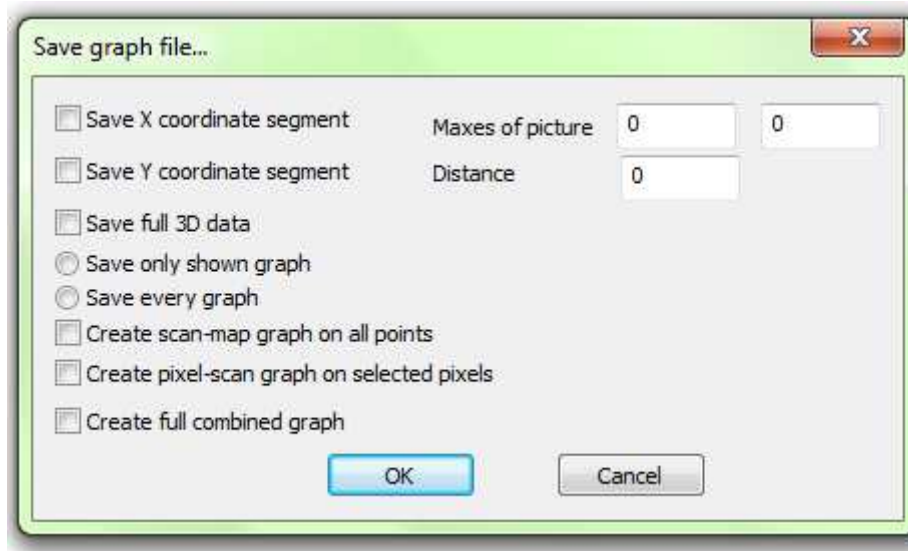
26. ábra – Az adatfeldolgozás dialógusa

A bal oldalt egy OpenGL-ben készült grafikonmegjelenítő vezérlő tölti ki, mellyel az aktuálisan betöltött mérés adatai jeleníthetők meg a 4.2.1-ben leírt módon. A vezérlő nem saját készítésű, hanem egy szabadon felhasználható ingyenes eszköz. Mivel viszonylag lassú, és sok esetben nem megfelelő a megjelenítés minősége, a jövőben saját, speciálisan erre az alkalmazásra elkészített DirectX alapú megjelenítő elkészítését tervezem.

A grafikon beállításai a Graph properties gomb segítségével állíthatók be, megjelenítés pedig a Draw Graph gombbal frissíthető. A megjelenített pixel koordinátái a Center Pixel Coordinates (X, Y) és a Shown Pixel Coordinates (X, Y) szövegdobozok értékeinek kombinációjával állíthatók be, a megjelenített mérés Z koordinátája a Shown elevation szövegdoboz értékével állítható, jól beállított mérési kezdőpont esetén a legjobb eredményt 0 beállítás kell, hogy adja. A Get Max of Image gombbal a mellette lévő szerkesztődobozzal a betöltött képek közül az adott sorszámú legfényesebb pixelének koordinátáit adhatjuk meg középpontnak, a Load Scan Start Point hasonlóan működik az 5.4.3-ban tárgyalt ugyanilyen nevű gombhoz.

A mérés betöltéséhez be kell állítanunk az Image Directory Path szövegdobozban a készült képek könyvtárának elérési útját kézzel, vagy a mellette lévő gombbal, az Open Scan File

gombbal meg kell nyitnunk egy scan-file fájlt, majd a Get Images gombbal be kell töltenünk a képeket. Innentől kezdve, ha nem kaptunk hibaüzenetet, a mérés összes adata betöltésre került, a Save Graph File gomb lenyomásával a megfelelő beállítások elvégzése után mentésre kerülhet(nek) a kívánt grafikon(ok). A beállítások a következő dialógusablakban történnek:



27. ábra – A grafikonfájl mentés dialógusa

Az elrendezés még fejlesztői alapú, kevésbé felhasználóbarát, ugyanakkor a szükséges funkciókat tartalmazza.

Ha a Save only shown graph ki van jelölve, akkor csak a gazdialógus grafikonján megjelenő adatokat menti el a szoftver, teljes 3D alakban (Save full 3D data) vagy/és valamelyik középső, tengely szerinti szegmensben (Save X/Y coordinate segment).

Amennyiben a Save every graph van kijelölve, a Distance szövegdoboz által meghatározott távolságban, a gazdialógus által meghatározott középpontban, vagy a Maxes of picture felirat melletti két szövegdoboz általtól-ig formában meghatározott képek maximumait véve középpontoknak, a gazdialógus által meghatározott szkennelési Z magasságban, a jobb oldal három alsó jelölőnégyzetben bejelölt módon egy kijelölt könyvtárba mentésre kerül az összes választott grafikon.

A grafikonok a jellegüknek megfelelő fájlnevet kapnak és három oszlopban, X-Y-Z formában, tabulátorral elválasztva kerülnek rendezésre.

Az elmentett fájlok a későbbiekben a vizsgált detektor minősítésére felhasználhatóak.

6. Elvégzett tesztmérések, példák az eredményekre

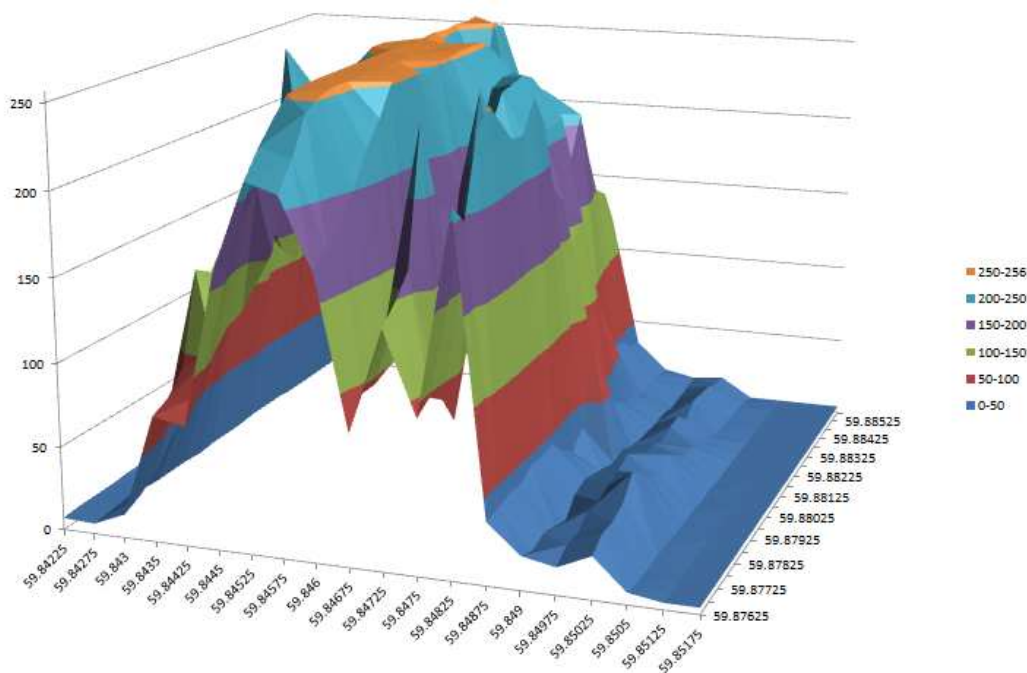
Az októberi időszakban több tesztmérést is végeztem a D525-ös optomechatronikai laborban a tanszéki CCD szkennelrel egy helyi kamera CCD detektorán, infravörös tartományban. Ennek eredménye mintegy 2,2 GB-nyi képadat, melyekből a legjobban felhasználhatónak egy 400 lépésből álló 640x480-as felbontáson készült mérési sorozatot találtam, a következőkben ennek eredményeit fogom bemutatni.

Ezen mérés mellett tervbe volt véve egy hosszabb, majdnem egy napos átfogóbb, nagyobb területű mérés is, mely reményeim szerint jó alapot nyújtott volna a pixelvizsgálat és képjavítás elvének bemutatására. Ez a mérés egy tanszéki számítógépen került elindításra, mely sajnálatos módon a mérés első felében lefagyott, és nem szolgáltatott elegendő adatot a feldolgozásra. A mérés azóta sem került elvégzésre, mivel az őszi időszakban a teszt szkennel nem volt használható állapotban. A következőkben a már említett 400 lépéses kisfelbontású mérés eredményeit ismertetem, illetve leírom a belőlük levont következtetéseket.

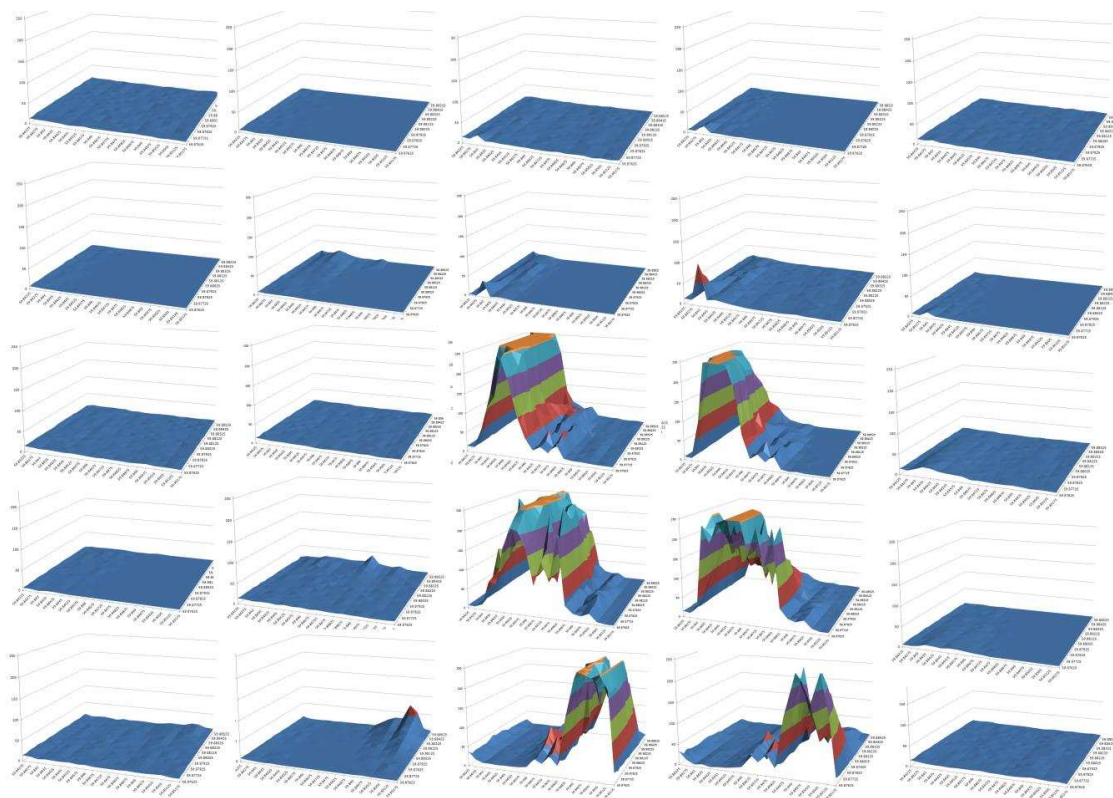
6.1. Elkészült grafikonok megjelenítése

A grafikonokat MS Excel 2007-ben jelenítettem meg. Mivel az Excel felületi diagramja nem kompatibilis az általam használt háromsoros leírási móddal, átalakításhoz kellett folyamodnom, melyet az Excel-en belül az eredeti grafikonadatok, azoknak transzponáltjai, illetve egy segédmátrix segítségével oldottam meg. Így az IDEX függvény felhasználásával létrehozható lett az Excel számára felhasználható mátrixos alak. Az alábbiakban az elkészült grafikonokra példát mutatok. Magyarázószöveget nem fűzök hozzájuk annak reményében, hogy azok az előzőekben ismertetett módszerek ismeretében egyértelműek.

6.1.1. Az egyes pixelek világosságértékei a transzlátorpozíciók függvényében

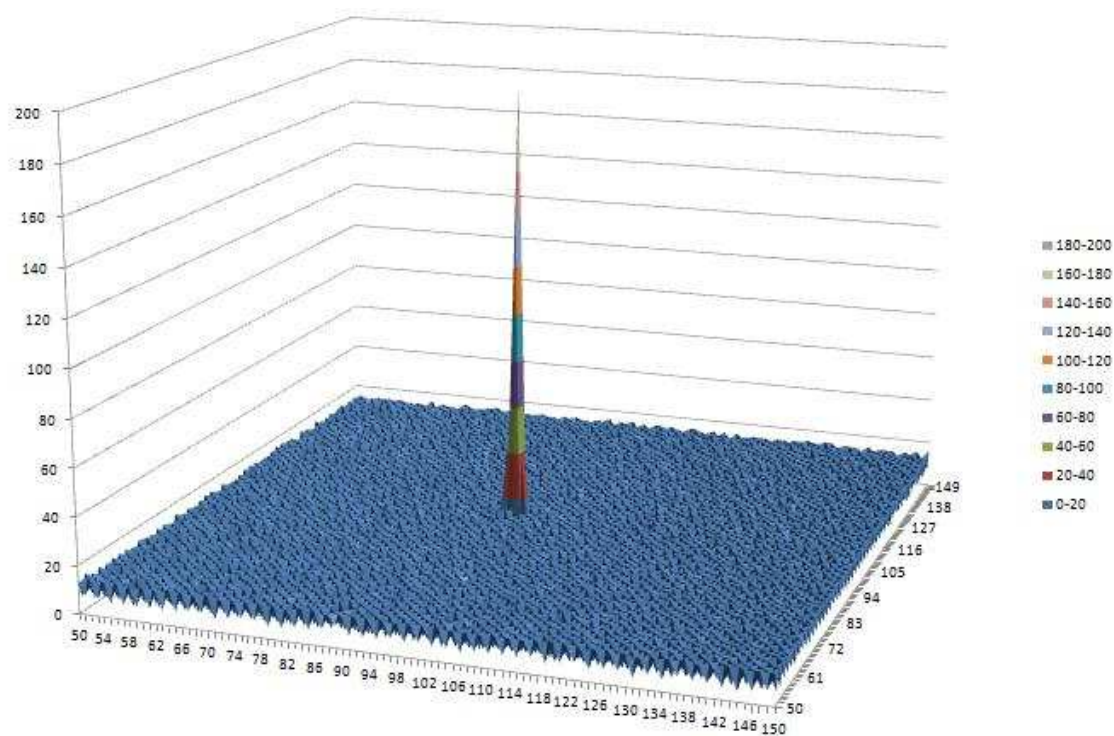


28. ábra – A0,-1 relatív címzésű pixelről készült grafikon

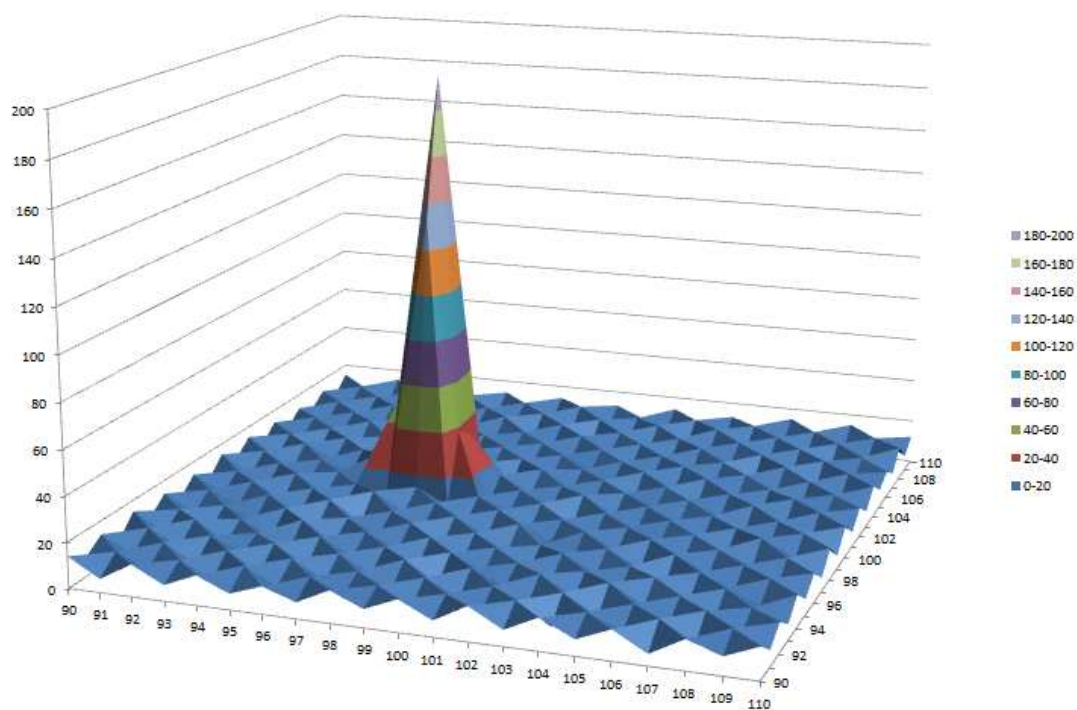


29. ábra – Egy 5x5-ös területről készült grafikonok, a 0,0 relatív címzésű pixelrel a középpontban

6.1.2. Az egyes transzlátorpozíciókban a detektor válaszai

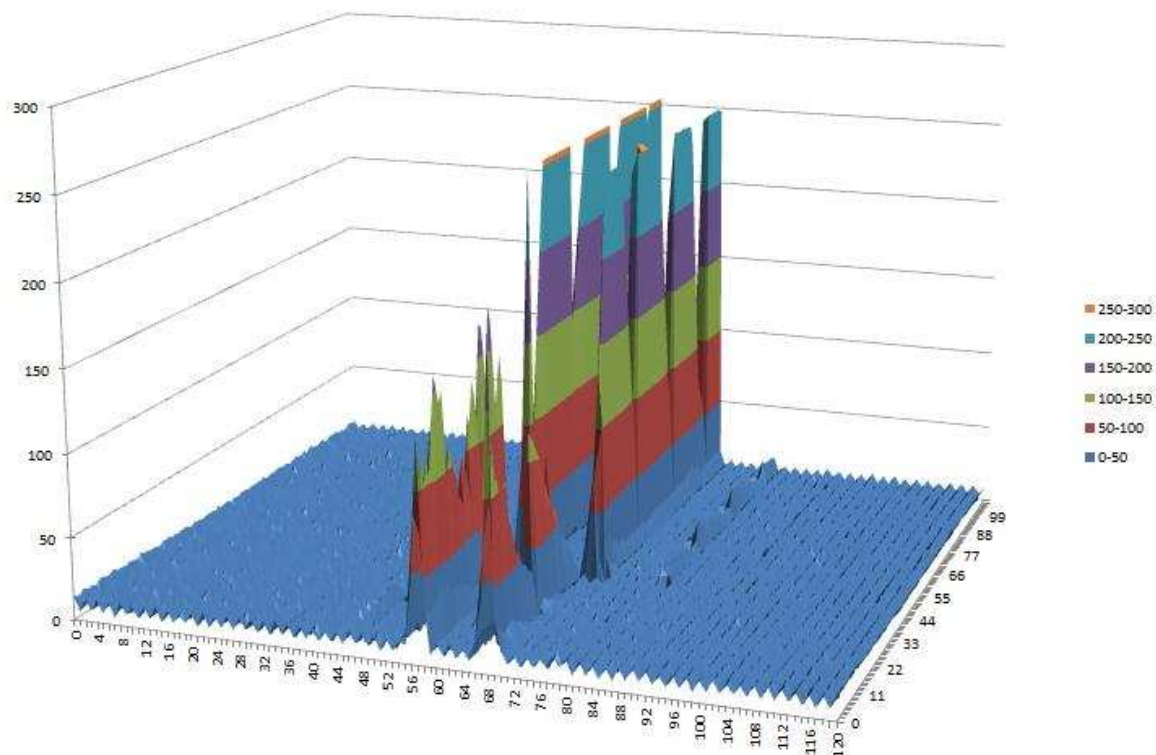


30. ábra – A szkennelési kezdőpontban készült grafikon (100x100 pixel látszik)



31. ábra – A szkennelési kezdőpontban készült grafikon (20x20 pixel látszik)

6.1.3. Kombinált megjelenítési módszer



32. ábra – Teljes szkennelés grafikonja kombinált megjelenítéssel – 121 pixel látszik, 100 lépésben

6.2. A mérési eredmények kiértékelése

A kiértékeléshez vegyünk alapul egy ideálisnak tekinthető CCD detektort. Ez esetben egy pixel válasza nem függ a környező pixelek válaszától, illetve attól, hogy a pixel felületének mely részét vizsgáltuk. Ennélfogva a szkennelés során a felületén eltalált pixel válasza egy a fényerőtől függő érték lesz, míg a CCD többi pixele 0 választ produkál, továbbá bármely pixelt vizsgáljuk ugyanígy, a válaszáérték ugyanaz lesz. Amennyiben két vagy több pixel határát vizsgáljuk, a válaszok összegének az egy pixel válaszához összegeével egyenlőnek kell lennie.

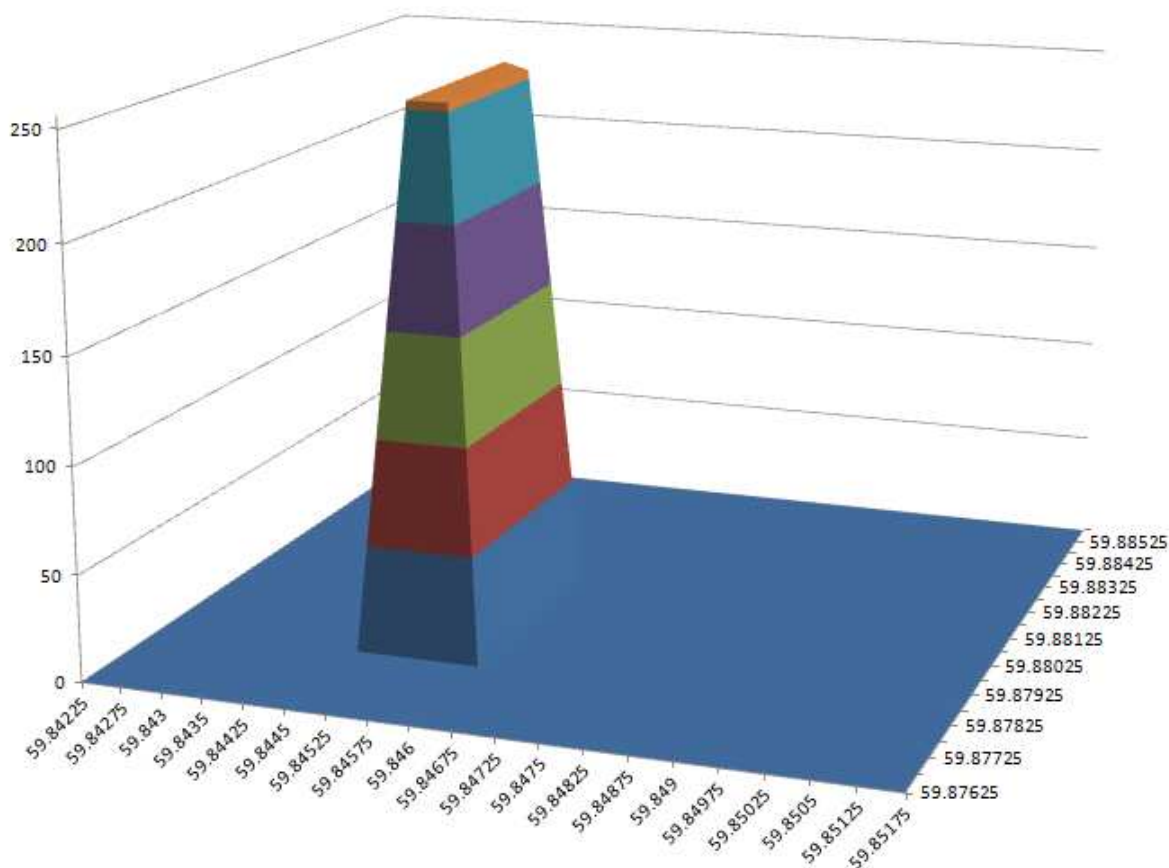
Ezen feltételezések figyelembevételével a kapott mérési adatok összevethetőek az ideális detektor elméleti adataival, ebből pedig egy optimális szűrő nyerhető, melyen átbocsájtva egy, a vizsgált detektorral készült képadatot, a készült kép az ideálshoz közelebbivé tehető.

Sajnálatos módon az elvégzett mérések hiányossága, illetve a pontos eljárások kidolgozottságának hiányában pontos értékelések még nem készíthetők el, a jövőben több mérésre, illetve az algoritmusok kidolgozására lesz szükség.

A grafikonokból ugyanakkor leszűrhetőek bizonyos tanulságok, melyeket a szkennerek későbbi fejlesztése során figyelembe lehet, és kell venni.

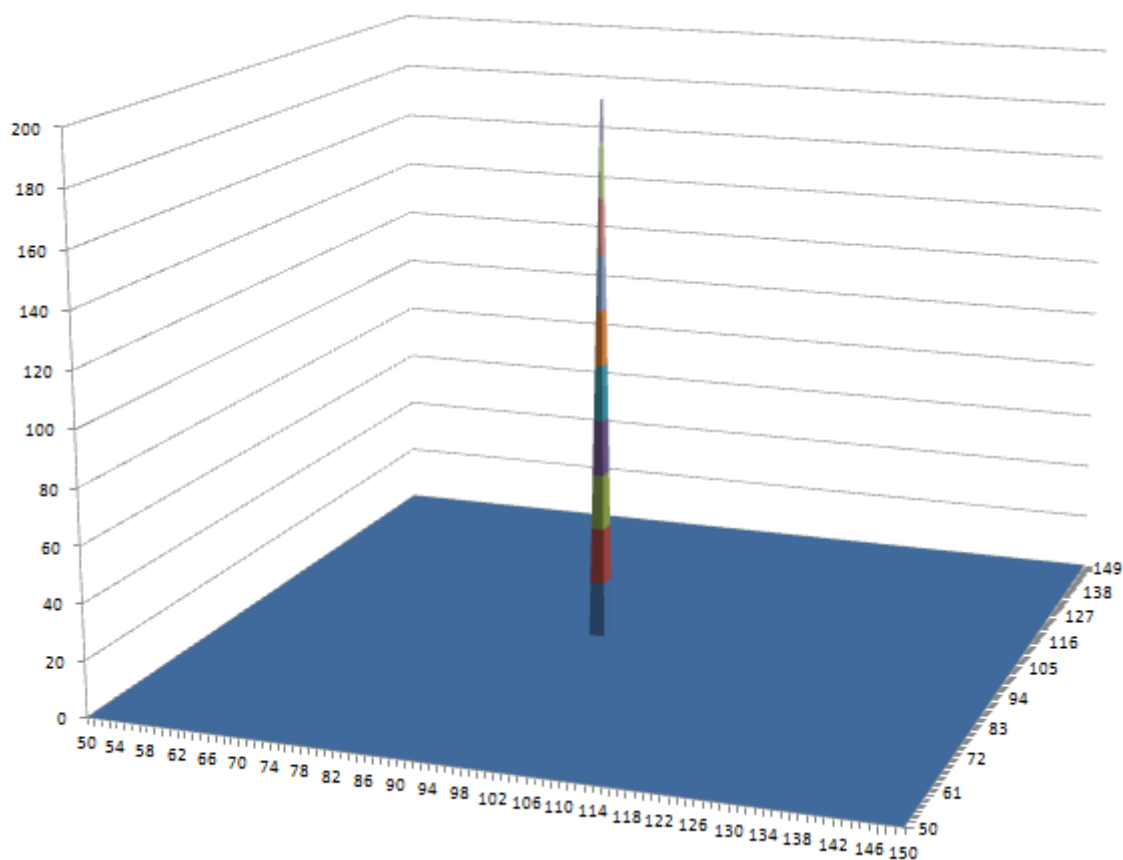
A 6.1.1-ben bemutatott grafikonon a mért térben több egyedi kiugró érték látható, amely jelentheti azt, hogy az eszköz nem mozgott a kép elkészítése előtt, vagy rossz helyen állt, ennél fogva maga a mérés hibás, többszörös mérésre, illetve pozícióellenőrzésre van szükség. Ugyanezen grafikonon túllövés is látszik, noha a mérés előkészítése során a fényerő megfelelő beállításra került. Ebből az következik, hogy ajánlott új dimenziókat bevezetni a fényerőt is, ugyanakkor ez jelentősen megnöveli a mérések időigényességét és a feldolgozandó adatmennyiséget.

A fenti tapasztalatok figyelembevételével a 6.1.1-ben bemutatott grafikon ideális formája a következő lehet:



33. ábra – A0,-I relatív címzésű pixelről készült grafikon ideális alakja

Ugyanezen tapasztalatok alapján a 6.1.3-ban bemutatott grafikon ideálisan:



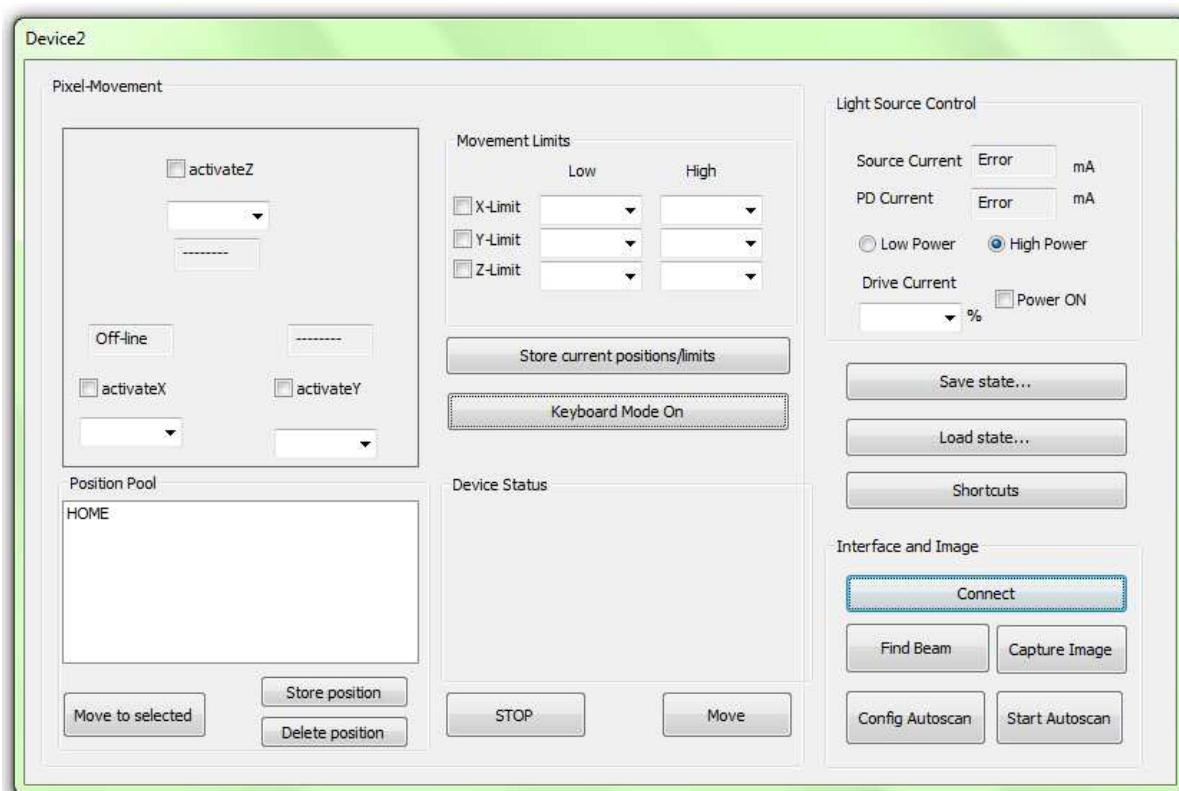
34. ábra – A szkennelési kezdőpontban készült grafikon ideális alakja (20x20 pixel látszik)

A fenti megállapítások és a mérés (illetve annak részleges sikertelensége) alapján az a következtetés vonható le, hogy a fejlesztés jó úton halad, az eredmények biztatóak, ugyanakkor további, egyes esetekben alapvető módosítások és fejlesztések szükségesek, a feladat semmiképpen sem tekinthető befejezettnek. Ugyanakkor az elvégzett munka során sikeresen megalapozásra kerültek a mérések elvégzéséhez és feldolgozásához szükséges eljárások, annak sikeres folytatásához elsősorban már mindössze további, jobb minőségű tesztmérések szükségesek.

7. Jövőbeli fejlesztések

A legfőbb jövőbeli feladat, melyet kitűztem magam elé, a szoftver alapvető újraírása a kezdeti tapasztalatok alapján. Mivel a beépítések egy már létező termék fejlesztésével készültek, előfordulnak más szemléletben megírt kódrészletek, melyek nem egészítik ki hatékonyan egymást. Ezen zavarok megszüntetése érdekében valószínűleg kevesebb energia-befektetéssel jár a mag újra elkészítése, mint az egyes problémák külön-külön megoldása.

Az újonnan elkészített szoftver már egy újabb felhasználói felületet fog tartalmazni, a megrendelő igényei, kérései alapján. Az új vezérlőpult további magyarázat nélkül a következőképpen néz ki:



35. ábra – Az új vezérlőpanel felépítése

További biztos jövőbeni fejlesztés a beépített grafikonmegjelenítés tökéletesítése, illetve a feldolgozáshoz szükséges munka csökkentése például az Excel által támogatott grafikonforma automatikus elkészítése.

Az ipari használat során felmerülhetnek, illetve valószínűleg felmerülnek újabb igények a szoftverrel szemben, melyeknek beépíthetőnek kell lenniük, és amelyek beépíthetőségét a

moduláris felépítés biztosítja. Erre lehet példa egy teljesen új berendezés vezérlésének megoldása, vagy eddig nem kezelt képformátumok beépítése, de ilyen eset teljesen új funkciók megtervezése és megoldása is.

A berendezés felhasználása elsősorban a tudományos célra készült detektorok esetében lehet számottevő, ahol felbontás növelése, illetve a kép javítása sohasem vihető túlzásba, egy ilyen típusú eljárás is az információtartalom jelentős növekedéssel járhat.

8. Összefoglalás

A dolgozat elején áttekintést adtam a választott irodalmak alapján a CCD detektorok működéséről, és a lehetséges hibaforrásokról. Ennek alapján rámutattam, miben különbözik a dolgozatban részletezett módszer az általánosan használt CCD kalibrálási és képjavítási módszerektől, illetve indokoltam a szükségességét.

Az irodalomkutatás elvégzése után röviden összefoglaltam a készült eszköz működését és irányítási elvét. Nem hangsúlyoztam, ugyanakkor utaltam arra, hogy az a pixelszkenner fejlesztése nem elsősorban tanszéki projekt, hanem a Max Planck Institute for Solar System Research németországi kutatóközpontja számára készül, ahol, amennyiben beválik az eszköz, csillagászati célú mátrix detektorok vizsgálatára alkalmazzák majd.

A felépítés leírása után rátértem a dolgozat elsődleges témájára, az adatfeldolgozásra, és ennek szoftveres megvalósítására, a szoftverfejlesztési problémák mellőzésével. Itt, amennyiben ez lehetséges volt, mind az elv bemutatásánál, mint a konkrét eredmények felsorolásánál igyekeztem a mondandómat grafikusán is szemléltetni. Az eredmények – a mérési adatok minden hiányossága ellenére - jól megfelelnek az elvárásoknak, a közeli jövőben minden valószínűség szerint az eljárás a kitűzött célra jól alkalmazható lesz.

Végül rámutattam a fejlesztési lehetőségekre, illetve utaltam a megbízóval való folytonos kommunikációra, és a felmerült igényekre. A jövőbeli fejlesztések felsorolásából reményeim szerint kiderül, hogy az eszköz és a hozzá tartozó szoftver jelenleg funkcionálisan működik, a szükséges javítások és bővítések jellege immáron sokkal inkább a felhasználó-barátságra és az optimalizálásra irányul.

Felhasznált irodalom

Courtney Peterson, „How it works: The Charged-Coupled Device, or CCD” Journal of Young Investigators Volume Three, Issue 1, 2001. március.

Link: <http://www.jyi.org/volumes/volume3/issue1/features/peterson.html>

Letöltés dátuma: 2011.05.02.

Fűrész Gábor, „CCD Alapismeretek I.”, Meteor 1992/16, 1992.

James R. Janesick, Charge-Coupled Devices. The Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2001: 22-35

Katie Yurkewicz, „Time Exposure”, Fermi News Volume 27, Number 5, 2004. május.

Link: <http://www.fnal.gov/pub/ferminews/ferminews04-05-01/p4.html>

Letöltés dátuma: 2011.05.02.

Nagy Zoltán, „CCD Szkenner fejlesztése”. 2010.

Link: http://www.gpk.bme.hu/index.php?option=com_content&view=article&catid=44%3Atdk-2010&id=262%3Accd-szkenner-fejlesztese&Itemid=1

Letöltés dátuma: 2011.05.02.

Nagy Zoltán, „CCD Szkenner fejlesztése”. BME GPK szakdolgozat, 2011.

National Air and Space Museum Explore the Universe kiállítása, „Hubble Space Telescope Wide-Field/Planetary Camera (WF/PC)”.

Link: http://www.nasm.si.edu/exploretheuniverse/etu_a_wfpc.htm

Letöltés dátuma: 2011.05.02.

Nyerges Tibor (szerk.), „Sharp: nagyfelbontású CCD érzékelő kamera mobilokba”. SG.hu, 2003. szeptember 8.

Link: http://www.sg.hu/cikkek/28828/sharp_nagyfelbontasu_ccd_erzekelo_kamera_

Letöltés dátuma: 2011.05.02.

Képek jegyzéke

1. ábra: A University of Nebraska-Lincoln csillagászati oktatóoldalának egy „CCD Simulator” című flash alkalmazása alapján.
Link: <http://astro.unl.edu/classaction/animations/telescopes/buckets.html>
2. ábra: Fűrész Gábor „CCD Alapismeretek I.” című cikkének egy ábrája.
3. ábra: Fűrész Gábor „CCD Alapismeretek I.” című cikkének egy ábrája.
4. ábra: Fűrész Gábor „CCD Alapismeretek I.” című cikkének egy ábrája.
5. ábra: A „Charge-coupled device” című Wikipedia egy illusztrációja alapján.
Link: http://en.wikipedia.org/wiki/Charge-coupled_device
6. ábra: Saját készítésű ábra.
7. ábra: Dr. Kovács Gábor által készített 3D modellek alapján.
8. ábra: Saját készítésű ZEMAX alapú ábra.
9. ábra: Az Edmund Optics terméklapja alapján. Link:
<http://www.edmundoptics.com/onlinecatalog/displayproduct.cfm?productid=2690>
10. ábra: Az Advantech USB-4716 multifunkcionális USB modul adatlapja alapján.
11. ábra: A PI C-863 Mercury DC szervó vezérlőegység adatlapja alapján.
12. ábra: Mérési eredmény alapján készült ábra
13. ábra: Saját készítésű ábra.
14. ábra: A szoftverről képelkapással készült ábra.
15. ábra: A szoftverről képelkapással készült ábra.
16. ábra: A szoftverről képelkapással készült ábra.
17. ábra: A szoftverről képelkapással készült ábra.
18. ábra: A szoftverről képelkapással készült ábra.
19. ábra: A szoftverről képelkapással készült ábra.
20. ábra: Saját készítésű ábra.
21. ábra: Egy scan-log fájlból képelkapással készült ábra.
22. ábra: A szoftverről képelkapással készült ábra.
23. ábra: A szoftverről képelkapással készült ábra.
24. ábra: A szoftverről képelkapással készült ábra.
25. ábra: A szoftverről képelkapással készült ábra.
26. ábra: A szoftverről képelkapással készült ábra.
27. ábra: A szoftverről képelkapással készült ábra.

28. ábra: Excel diagramról képelkapással készült ábra.
29. ábra: Excel diagramról képelkapással készült ábra.
30. ábra: Excel diagramról képelkapással készült ábra.
31. ábra: Excel diagramról képelkapással készült ábra.
32. ábra: Excel diagramról képelkapással készült ábra.
33. ábra: Excel diagramról képelkapással készült ábra.
34. ábra: Excel diagramról képelkapással készült ábra.
35. ábra: A szoftverről képelkapással készült ábra.