



ÓBUDAI EGYETEM
ÓBUDA UNIVERSITY

TDK dolgozat

Pásztázó lézermikroszkóp fejlesztése

Development of scanning laser microscope

Szerző:

Burian Sándor, AWXYHE

Témavezetők:

Dr. Prof Kozlovsky Miklós
Kucarov Marianna Dimitrova

Budapest, 2022

Tartalom

Összefoglaló	4
1. Bevezetés	5
2. Irodalomkutatás - Mi az a mikroszkópia.....	6
2.1. Az optikai mikroszkópia – fénymikroszkópia – mikroszkópiai alapfogalmak.....	7
2.2. A pásztázó lézerszkennerek mikroszkópok működése.....	8
2.3. A lézerszkennerek mikroszkópok fajtái, jelenleg használatban levő modellek, kísérlet szempontjából érdekes megközelítések	8
3. Tervezés	11
A OV5647 szenzor képalkotása és használata	15
A használt módszer.....	15
4. Fejlesztés	29
Felhasználási lehetőségek (Use-Case).....	29
4.1. Az optikai rendszer	29
4.2. Az állvány elemei	32
4.3. Állványkezelő áramkör.....	36
4.4. Az áramkör vezérlése ESP32 alapon.....	37
4.5. Mérés és állványmozgatás végzése rPI alapon.....	38
Az általam kipróbált mérési módok	41
3.6 Adatvizualizáció 2D-3D	41
3.7 Összefoglalva a megvalósítást.....	43
5 Tesztelés	44
5.1 Hardware tesztelés	44
5.1.1 Az optika tesztelése	44
5.1.2 motorvezérlés beágyazott rendszere.....	49
5. Felhasználási lehetőségek – felhasználói dokumentáció	50
6.1 Az állvány felhasználási lehetőségei	50
6.2 A képalkotás felhasználási lehetőségei... Error! Bookmark not defined.	
4 Továbbfejlesztési lehetőségek.....	52
4.1 Állvány	52

Vizualizáció	52
Optika	52
Beágyazott rendszer	52
5 Összefoglalás	53
Köszönetnyilvánítás	53
Rövidítésjegyzék	54
Ábrajegyzék.....	Error! Bookmark not defined.
Képletjegyzék	Error! Bookmark not defined.
Táblázat jegyzék	Error! Bookmark not defined.
Kódtörödékek jegyzéke	Error! Bookmark not defined.
Irodalomjegyzék	55

Összefoglaló

A pásztázó lézer szkennerek működése egy érdekes informatikai, optikai feladat, melynek használatával nagy pontosságú modellt, képet alkothatunk egy-egy szkennelt felületről. Dolgozatomban az általánosan használatos mikroszkópok működését vizsgálom meg, illetve hasonlítom össze. Ezek alapján egy hasonló elven működő eszköz építésére adok példát, az építés esetleges nehézségeit kiemelve, az azokra talált megoldásokat megmutatva, lehetséges más megoldási utakat felvázolva, ha nem is mindegyiket kifejtve, de legalább bemutatva mint lehetőség, továbbá a dolgozat célja, hogy kiderítse, hogy milyen pontosságú kép, modell hozható létre egy ilyen eszközzel, amennyiben azt magunk fejlesztjük, erre különböző mérések végzése után azok összehasonlítását bemutatva esetleges továbbfejlesztési lehetőségeket, irányokat felvázolva.

A lézer szkennerek technológiai szempontból azért jelentenek kihívást, mert egyszerre kell optikával, beágyazott rendszerrel, képalkotással és adatvizualizációval foglalkozni, valamint mindezeket összehangolni ahhoz, hogy egy jó, működő eredményt kaphassunk. Ehhez kiindulásként szükséges megismerni a mikroszkópia általános működését, a lézer szkennerek működési elvét és sajátosságait, a szkennelés folyamatát és az ahhoz szükséges beágyazott rendszerek összehangolását, valamint a megfelelő adatvizualizációs módszereket.

Lézer szkennerek segítségével digitalizálhatjuk a világunk számos elemét, így képesek vagyunk objektumok felületéről nem csak képet, de 3D modellt is alkotni. A mikroszkópia esetében az objektumunk többnyire tárgylemezeket jelent, amelyeken található mintákról vagyunk képesek felületi “domborzati” képet alkotni.

Ehhez egy fénysugárral igyekszünk minél kisebb egységenként rávilágítani az objektumra, az onnan visszaverődő fénysugár erősségét lemérve pedig megtudjuk a felület vagy anyagtulajdonságának változását, vagy amennyiben közel homogén anyagról van szó (tárgylemezeken található minták esetében utóbbi esetről beszélünk), akkor a felület magasságbeli eltéréseiből adódóan kapunk mérési eltéréseket. Ezekből a mérési adatokból alkothatunk 2D vagy 3D objektumot is végeredményként, melyekre majd látunk példákat.

Mivel korábban nem volt tapasztalatom sem optika, sem mikrokontrollerek vagy áramkörök készítése, tervezése terén, így a feladat több szempontból is kihívást jelentett. Mikor fejlesztés közben kiderült, hogy szükséges még hozzá 3D tervezési, modellezési képesség, valamint 3D nyomtatáshoz is valamennyi háttérismeret akkor az általam nem ismert, de szükséges technológiák sora bővült. Ennek köszönhetően szinte minden, ami a dolgozatban megjelenik számomra újdonságnak számított.

1. Bevezetés

Mivel a jelenleg piacon levő ilyen típusú eszközök árban és méretben nehezen elérhetőek, valamint az ipar zártsága miatt nem áll rendelkezésre megfelelő fejlesztőkészlet a vezérlés programozott, automatizált végzésére, ezért a dolgozat célja, hogy kiderítse, milyen maximális pontosság érhető el a piaci normákhoz képest alacsony költségvetés mellett, részben vagy egészben nyílt forráskódú alapokra támaszkodva.

A dolgozat első felében a lézer szkennerek működési elvét mutatom be, majd ebből kiindulva egy rövid piaci összefoglalásban mutatok rá a piacon elérhető és a nyílt forráskódú eszközök közötti hasonlóságokra, hiányosságokra, melyből egyértelművé válik egy ilyen eszköz szükségessége. Ezt követően a szükséges optikai, hardver és szoftver részegységekkel szemben támasztott igényeket mutatom be, illetve az általam a probléma megoldására készített eljárásokat mutatom be.

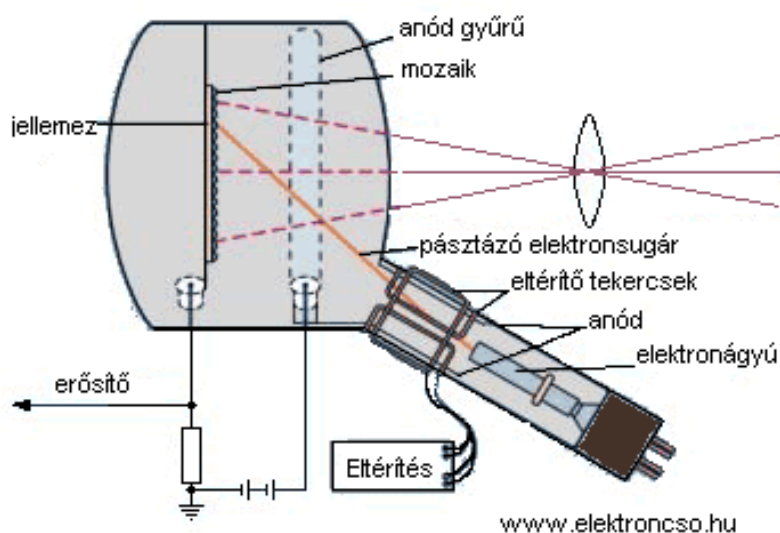
Kutatásom egy mérési összefoglalóval zárom és annak a továbbfejlesztésére tett javaslatokkal, melyekkel a mérések pontossága és az eszköz megbízhatósága növelhető.

2. Irodalomkutatás - Mi az a mikroszkópia

A mikroszkópia egy olyan területe a képalkotási eljárásoknak, ami általában abban segít, hogy szabad szemmel nem látható részleteket figyelhessünk meg mintákon vagy objektumokon [1]. A mikroszkópia gyűjtőfogalom, a lágytól a keményebb anyagokon át a fényáteresztő és nem áteresztő anyagtulajdonságokkal együtt nagyon sokféle felhasználása létezik. Az elmúlt években határozottan állíthatjuk, hogy rengeteget fejlődött.

Az elektronmikroszkópok segítségével túlléphetünk az optikai rendszerek nyújtotta lehetőségeken. A katódsugaras eszközökkel már a múlt század húszas éveiben jelentősen sikerült növelni a felbontást, bebizonyosodott, hogy mágneses és elektrosztatikus közegek úgy használhatóak töltött részecskék esetén, ahogy lencserendszerek a fény esetén [2]. Később ezt az elvet továbbvitték számos más mikroszkópiás eljárás esetében is.

A kameracsövek pont fordítottnak működnek, mint a régi televíziók. Itt a képet nem vetíteni, hanem leolvasni szeretnénk a lencséről. Ezután azt digitalizálhatjuk is. Ahogy alább az ikonoszkóp működési ábráján látható, a lencsénél fókuszált kép a „jellemzőre” vetül, ahol a megvilágítás ellenállásváltozást okoz a jellemző anyagtulajdonságai okán. Ez az ellenállásváltozás adja a digitalizált képpontok információs tartalmát, úgy, hogy egy elektronsugárral végigpásztázzuk a lemezt, ahol a kisülésekkor áram indukálódik, amit rögzítünk, mint „jeláram” [3].



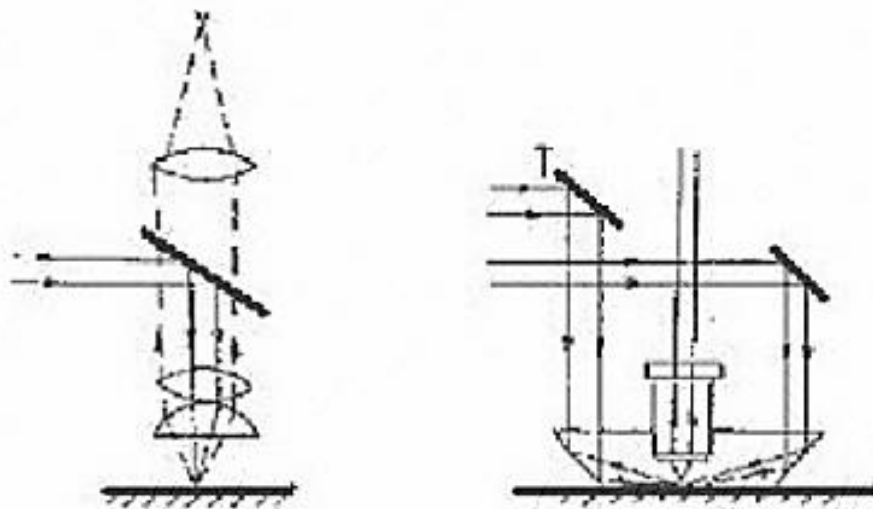
1. ábra - Ikonszkópos képalkotás folyamata [4]

A képfelvevő csövek az 1920-as évektől kezdve gyors fejlődésen mentek át, amíg az 1950-es évekig a vidikon vagy plumbicon el nem terjedt, ami a monochromatikus képalkotás ilyen jellegű csúcsa volt. Ezen megoldások a fényérzékeny réteg összetételében voltak különbözőek. A képcsövekkel ellentétben azonban a pásztázható terület kicsi és az elektronnyaláb megfelelően pontos kell legyen ahhoz, hogy elérje azt a párszázszoros nagyítási felbontást, amire képes [5]. Érdekességgé megemlíteném, hogy rövid ideig zajlott vidikon fejlesztés és gyártás is Magyarországon az 1960-as években.

2.1. Az optikai mikroszkópia – fénymikroszkópia – mikroszkópiai alapfogalmak

A fénymikroszkópok talán a legegyszerűbb mikroszkóp típusok, hiszen működésükhöz a természetes napfényt is felhasználhatjuk, amivel megátvilágítjuk a vizsgálni kívánt mintát, amiről a visszaverődő fény valamilyen módon a vizsgáló szemébe, vagy digitális mikroszkóp esetén a kamerába jut.

A nem átlátszó minták, például fémek vagy közetminták felületének vizsgálatához csak visszavert fényt használhatunk, ez azt jelenti, hogy tükrök segítségével ugyanabból az irányból világítjuk meg, mint ahonnan nézzük a tárgyat [6]. Ezt nevezik világos és sötét látóterű megvilágításnak is, ahogy az alább jól látható.



2. ábra - Világos (bal oldali kép) és sötét látóterű (jobb oldali kép) megvilágítás elve [7]

Fontos kiemelnünk, hogy a felületi változásokat minden esetben a sötét látóterű mikroszkópok képe adja vissza jobban mivel a felületre a fényt egy polírozott felület vetíti a tárgylemezre, ahogy az a fenti képen is látható. A sötét látóterű mikroszkópok előnyösek a kontrasztosítás elérésére is, mivel ezekkel festés nélkül is ki tudjuk emelni a kontraszt nélküli tárgyak vagy a fázistárgyak, azaz csak

törésmutatóban különböző tárgyakon [8] található különbségeket [9], úgy is fogalmazhatnánk, hogy a sötét teres megoldások a fáziskontraszt olcsó megoldásai [10].

A legtöbb optikai rendszereket használó mikroszkóp esetében a kapott kép felbontását és nagyságát a beépített lencserendszer tulajdonságai határozzák meg. A nagyítást a tárgylencse és a szemlencse nagyításának szorzata, vagy, ha van, akkor a köztük található lencsék nagyításának szorzatai adják.

A felbontóképességet általában vonalpár/mm-ben adhatjuk meg, de nevezhetjük a tárgyon mérhető legkisebb távolságnak is. Ezek szubjektív értékek, objektív értéket az Optikai Átviteli Függvény ad, ez a kimeneti jelek és a bemeneti jelek Laplace-transzformáltjainak hányadosa [11]. A lencséken, valamint a lencsék közti közeg okán megjelenő fényelhajlás jelensége egy másik olyan jellemző, ami szintén fizikailag lekorlátozza a fénymikroszkóp működését, ezt nevezik az objektív numerikus apertúrájának. Ezt a legkönnyebb a közeg megváltoztatásával javítani (például olajok segítségével) [12], ugyanakkor a gyakorlatban ez hosszas pluszmunkát jelent a felhasználó számára.

2.2. A pásztázó lézerszkennerek mikroszkópok működése

A lézerszkennerek mikroszkóp az eddig bemutatottakból a sötét látóterű mikroszkópokhoz hasonlít a legjobban. Működése egyszerű: fénynyalábbal végigpásztázzuk a megfigyelni kívánt felületet, majd a visszaverődött fény erősségét lemérjük. Ezekből a mérési adatokból képet alkothatunk vagy akár 3D modellt is a felületről. A visszaverődések két okból adhatnak egymástól eltérő értéket. Az egyik, ha nem homogén a minta, akkor a különböző anyagok különböző törésmutatója miatt különböző értékeket kaphatunk vissza. Másik ok pedig a felület elváltozásai lehetnek, amennyiben nem egy sima felületről van szó.

A kapott visszaverődő fény pontosabb méréséhez alkalmazhatunk optikai eszközöket, mint például gyűjtőlencsét vagy a fénysugár szélét „levágó” lyukat, pinhole-t.

2.3. A lézerszkennerek mikroszkópok fajtái, jelenleg használatban levő modellek, kísérlet szempontjából érdekes megközelítések

Számos megvalósítása létezik, alább a teljesség igénye nélkül emelnék ki párat, a kísérlet szempontjából érdekesebbeket.

Az elektroncsöves megoldás megjelent a lézerszkennerek mikroszkópiában is [13], úgy, hogy akár a letapogatás során a sugár rögzített a működés közben [14]. Ez egyszerűsíti a működés folyamatát.

Ugyanakkor, mivel ez egy költséges és komplikált megoldás, ezért érdemes más megvalósítást is figyelembe vennünk. Így gondolták ezt a British Columbi

Egyetemen, ahol hasonló eljárást fejlesztettek, egy új elektronforrás használatával és ezáltal a vákuum mennyiségének és pontosságának csökkentésével csökkentik a költségeket [15].

Az elektromágnesekkel történő irányítás ötletét figyelembe véve és kifordítva a csöves megoldásokból, a DVD és CD olvasókhoz hasonló fejmozgatást érhetünk el [16], vagy pont ezt a fejet is használhatjuk fényforrásként [17], igaz így nagyon kis mintákat tudunk majd végigpásztázni. Ebből egy nyílt forráskódú és hardverű eszköz is született pár évvel ezelőtt „Open Source Laser Scanning Microscope (OpenLSM)” néven a GaudiLabs gondozásában [18]. Ezt kiegészítve egy mozgatható ággal, egy vezérelt állvánnyal és hozzá a pontosabb élességbeállítás végett egy audio erősítővel jelentősen jobb eredményeket érhetünk el [19], a vákuumcsöves megoldásokhoz képest sokkal olcsóbban és nem utolsósorban sokkal kevésbé lesz érzékeny a környezeti hatásokra is a kapott eszköz.

A Leica egy komplex optikai rendszerrel oldotta meg ezt a problémát, amiben a fényforrás változtatásához igazíthatunk különböző beépített törésmutatójú optikai eszközöket [20]. Ez a megoldás egyszerűen jobb, mint a korábbi verziók, más szempontból pedig érzékenyebb, hiszen nem használ drága, komplex csöves rendszereket, helyette a fejlett optika az, ami sebezhetővé teszi. A képalkotáshoz is számos mechanikai alkatrészt használ, ami szintén meghibásodási pont lehet a későbbiekben.

A szkennerek alapvető problémája, hogy a fénysugárnak végig kell pásztáznia a szkennelendő objektum felületét. Ezt, ha nagyobb méretben szeretnénk megtenni és nem szeretnénk komoly optikai rendszert mögé felépíteni, akkor kétféleképpen oldhatjuk meg. Az egyik az, hogy tükröket mozgatunk motorok segítségével, így nagyobb objektumot is képesek vagyunk lefedni [21]. Ugyanakkor így a visszavetülő fénysugarat is hasonlóan kéne „elkapjuk”, attól függően, hogy éppen milyen szögben mozdítottuk el a tükreinket. Ez értelemszerűen megnehezítené a képalkotást, valamint a pontosságot lekorlátozná a használt motorok és a vezérlőszoftver meghatározható legkisebb lépésközére.

Másik lehetőség a fénysugár fixen tartásával és az állvány mozgatásával elérhető pásztázás [22]. Ennek nagy előnye, hogy gyakorlatilag csak az állvány méreteitől függ, hogy mekkora mintát tudunk letapogatni, ahogy azt a Breaking Taps YouTube-csatornán is bemutatták egy OpenFlexure állvány segítségével.

Összegezve ezeket a módszereket láthatjuk, hogy széles a skála mind az ár, a komplexitás és az elérhető eredmények terén is, ehhez egy összefoglaló táblázatot készítettem alább, melyben a főbb paramétereket próbáltam összegezni, természetesen, ahol ez nem egy ismert információ, csak becslést írtam rá, ugyanakkor jeleztem egy '*' jellel. Ahol egy skálán ábrázolható az adott értékelési szempont, ott az 1-5 -ig. értendő.

Értékelési szempont	Komplexitás	Építési	Ár	Továbbfejlesztési lehetőség	Felhasználási módok bővítése	Open source?	Elérhető-e API?
Breaking Taps	2	3	30000 – 50000* Ft	Szoftveresen	-	Igen	Nem
Arduino XY szkennel	1	1	20000 – 30000* Ft	Sok, szükséges is.	Sok, szükség es is	Igen	Igen
Leica TCS SP8 MP	5	5	\$79,999 ⁱ től kezdődik	Leica eszközökkel és szoftverekkel lehetőség adott	Gyári eszközökkel	Nem	Fizetős
OpenLSM	1	2	20000* Ft	szoftveresen	-	Igen	Igen
DIY DVD olvasóból	1	1	5000 Ft ⁱⁱ	nincs	-	Igen	Igen
Vákuumcsőves elektron mikroszkóp	5	5	\$75,000 - \$10,000,000 ⁱⁱⁱ	Nincs, gyárilag zárt	-	Nem	Nem
Elektroncsőves felépítés	4	5			-	Nem	Nem

1. táblázat - Az ismertetett különböző mikroszkópok összegző táblázata

Ahogy a fentiekből látható, a fix optika és az állványmozgatás az, ami egyszerűbben megoldható, valamint, mivel ez tűnt a környezeti hatásokra legkevésbé érzékeny megoldásnak, legkönnyebben továbbfejleszthetőnek és nem utolsósorban Open Source forrásokkal rendelkezőnek, ezért én is ezen az úton indultam el.

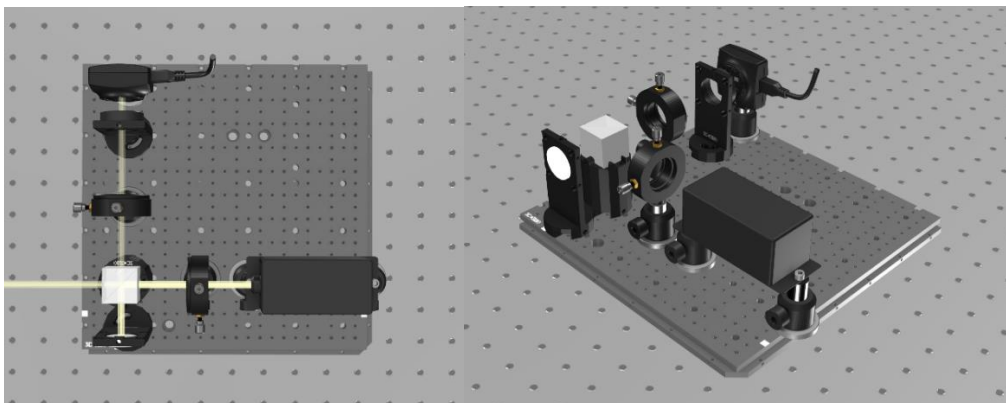
ⁱ Becslés, rendelésre szállítanak egyedi ajánlattal. Forrás: <https://www.biocompare.com/7567-Confocal-Microscopes/5169738-Personal-Confocal-Imaging-System/#:~:text=For%20a%20limited%20time%2C%20get,get%20started%20with%20confocal%20imaging>. Hozzáférés 2022. 11. 10.

ⁱⁱ 2022. novemberi árakon.

ⁱⁱⁱ 2022. Márciusi cikk alapján. <https://www.labmanager.com/product-focus/electron-microscope-price-including-cost-of-50-different-models-27758#:~:text=According%20to%20the%20type%2C%20configuration,to%20%24550%2C000%20depending%20on%20condition>. Hozzáférés, 2022. 11. 10.

3. Tervezés

Ahogy alább is látható, a saját pásztázó mikroszkópunk elkészítéséhez egy optikai rendszert alkalmaztam, mely a visszaverődő fénysugarak alapján képes különbséget tenni a visszaverődő fény visszaverődési pontjának távolságai között. A fényforrásból kijövő fény egy 50%-os beam-splitter azaz egy 50%-ban fényáteresztő viszont ugyanakkora mértékben fénytörő tükör [23] segítségével megtörik, majd a tárgylemezre esik, ahonnan visszaverődve a beam-splitteren keresztül - egy pinhole-t használva élesítésre - a fényérzékeny ellenállásra vetül, ahol az intenzitását mérjük.



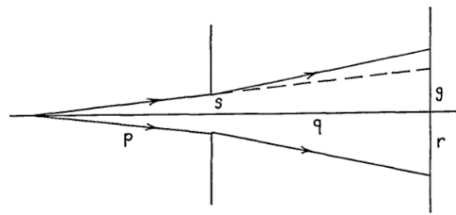
3. ábra - A saját fejlesztésű mikroszkóp optikai rendszerének terve, bal oldalon a fényeket jelölve, jobb oldalon oldalról nézve, fénysugár nélkül. (A terveket a 3D OPTIX webalkalmazás segítségével készítettem)

A pinhole gyakorlatilag egy megfelelő átmérőjű lyuk csupán, ugyanakkor azt a célt szolgálja, hogy mivel pontszerű forrásból érkezik a fény, ezért a hullámokon torzulás keletkezik, melyeket érdemes kiszűrniük. Ezek az alacsony rendű Fourier-komponensek, melyek kiszűrésével élénkítjük a képet és élesítjük a kontrasztot [24]. Azaz, felhasználjuk azt a már 1600-as években bemutatott eljárást [25], mely biztosítja számunkra azt, hogy csak a fókuszban levő tárgyak képe jelenjen meg élesen. Ebben az esetben, ha valami nincs a fókuszban, akkor a róla érkező fény nem fog pont a szenzoron képet alkotni, tehát a szenzorra kevesebb fény vetül, tehát a mérhető fény intenzitása is csökken.

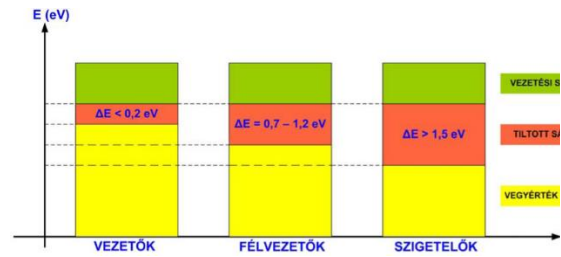
A fényintenzitás változásának méréséhez két alapvető módszert különböztethetünk meg ez esetben, mindkettőben közös, hogy fényérzékeny ellenállást használunk. A fényérzékeny ellenállások érzékenysége széles skálán mozog, ezért ami elérhető és mégis használható eszköz erre a célra, az lehet egy kamera.

A fényérzékeny ellenállás sokféle eszköz segítségével megvalósítható. Ezek különböző tulajdonsága is kihasználható a tervezés során. A fényérzékeny ellenállás egy félvezető vagy félvezetővel bevont polikristály [26], mely a fény különböző hullámhosszára behangolva változtatja áteresztő képességét. Tehát, a

félvezetők tulajdonságából adódóan a felületre érkező hő az, ami a vezetőképességet megváltoztatja, illetve a belső/külső erőter megjelenése [27], ami szinte egyszerre következik be [28]. A félvezetők rendkívüli érzékenysége a hőre vonatkozóan [29] azt jelenti, hogy a rendszer maga is érzékeny lesz a hőmérséklet ingadozásra. Épp ezért a szkennelés ideje alatt az előre bekalibrált érték, azaz, hogy a vizsgált felület „fókuszban van” tulajdonképpen az arról érkező hőtől függ. Tehát például aktív hőkibocsátással rendelkező objektumot nem tudunk szkennelni, sem a mérést false-positive értékek nélkül elvégezni környezeti hőmérséklet ingadozás esetén.



4. ábra - pinhole működési elve [30]



5. ábra - Különböző testek vezetőképessége a vegyértékelektronok mennyiségétől függ, amik a vegyértéksávot képezik egy-egy atom körül, ezek a kémiai kölcsönhatásba kerülhető elektronok [31]

A kamerákat használó esetben az intenzitás kiszámításához nagy előny, hogy nem kell külön mozgatnunk a szenzort, pinhole-t, lencsét, hanem elég helyben tartani és a fókusz változásával a több vagy kevesebb mennyiségű fényt megmérni, ami a szenzorra vetül, azaz a nem sötét pixelek számát mérni mérési pontonként. Ez történhet RGB színtartományban vagy szürkeárnyalatban. Az utóbbi esetén kérdés, hogy milyen szürkeárnyalat konverziót használunk, ugyanakkor ez csak a mérési tartományunk nagyságát, skáláját fogja befolyásolni, azaz a végső vizualizációnak a nagyságát, amelyet akár egy szorzóval külön állíthatunk, skálázhatunk utólag is.

Az alapelveket a foton számlálási módszerek adják, természetesen abban az esetben általában erre dedikált szenzort használnak. Ilyen a Quanta Image Sensor (QIS) [32]. Az ilyen szenzorok esetében többnyire egyetlen fotonos lavinadiódáról (SPAD) beszélhetünk, melyek többnyire monokróm képet adnak. Ezen eszközök az általánosságban elterjedt detektorokkal szemben nagyobb áramerősséget adnak, mint amelyeket a beérkező fotonok maguktól indukálnának és megnövelik a töltéshordozók sebességét, így gyors jelek észlelésére is alkalmassá válnak. Akár a nano-secundum törtrésze is elérhető ilyen eszközök segítségével. A megnövelt áramerősségnek köszönhetően a töltéseket megsokszorozzák, hiszen növelik a szabad töltéshordozók számát, ugyanakkor egyértelműen ezen eszközök nem a megvilágítás nagyságát, hanem a fény jelenlétét veszik alapul. Hátrányuk, hogy a lavina-hatás miatt nagy a jelzaj, valamint az eszközök rendkívül hőmérsékletfüggőek [33]. Ilyen típusú eszközökkel egészen a közelmúltig (2019) csak monokróm képeket rögzítettek a fent vázolt mechanizmus okán.

Színes képek alkotásánál ilyen eszközökkel nem csak a kis felbontás jelentett akadályt, de a képalkotási mechanizmus is újdonságnak számít. Itt többek között hullámhossz alapján Bayer szűrőkön vezetik át a jelet és így alkot színes képet. Ahogy azt láthatjuk QIS-ben minden pixel kisebb csoportokra, „jot” -okra osztva elég érzékeny a fotonszámláláshoz, ugyanakkor éppen ezért és feladatából adódóan, kevés pixel is elegendő a mérések elvégzéséhez. Szemben ezzel a „hagyományos kamerák” többségében található CMOS szenzorok a fotonokat felhalmozzák, majd a töltéseket feszültséggé alakítva adnak egy digitális jelet [34]. Tehát gyenge fény esetén vagy kis szenzorméret esetén kevés fotont halmoznak fel. Ekkor szintén megnőhet a zaj mennyisége. A fotonszámlás talán legfontosabb eleme a kvantumhatékonyság. Ez az elektronok keletkezésének valószínűsége, amikor egy foton ütközik egy fotó katóddal. A fotó elektronok számossága fotononként bináris értékű, tehát ahogyan az (1) képlet is mutatja.

$$\text{elektron keletkezésének valószínűsége} = \frac{\text{egységnyi idő alatt kibocsájtott elektronok számossága}}{\text{fotokatódon beeső fotonok átlagos számossága}} \quad (1)$$

Ezen kívül az észleléseknek valószínűsége függ a fotó katódok számosságától, a fotonok számától, a megszámlált darabszámtól [35] amint ez a (2) képletben látható:

$$\text{észlelés valószínűsége} = \frac{\text{darabszám}}{\text{beérkező fotonok száma}} \times 100\% \quad (2)$$

Ugyanakkor pixelenként lebontva Bayer szűrőket használó szenzorok esetén ezt az értéket már csupán valószínűségként tudjuk megadni. Ilyenkor a szűrőnél használt színcsatornákkal számolunk, attól függetlenül, hogy valójában a szenzorunk képes-e színcsatornákon színeket megkülönböztetni, vagy sem. Poisson eloszlással minden színcsatornán előállíthatóak ezen értékek az adott színcsatorna fényességértéke és a fotonok várható számának szorzataként [36] azaz a (3) -as egyenletben látható módon

$$Poisson(p = \overline{B_\omega}(x, y) \times n_p) \quad (3)$$

Amiben a következő változók szerepelnek:

- n_p : A beérkező fotonok becsült számossága.
- $\overline{B_\omega}(x, y)$: Az x, y koordinátájú pixelen ω színcsatornán vett normalizált intenzitás érték.

Utóbbit a (4) -es egyenletben látható módon is kifejezhetjük [37], az alábbiak segítségével:

- $B(x, y)$: egy Bayer kép pixeljei;
- n, m : a méretei;
- $B_\omega(x, y)$ az x, y ponton vett intenzitás érték ω színsatornán;
- p pedig Poisson eloszlással generált random számok $\overline{B}_\omega(x, y) \times n_p$ paraméterrel.

$$\overline{B}_\omega(x, y) = \frac{B_\omega(x, y)}{\sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n B(x, y)} \quad (4)$$

Természetesen nem csak QIS szenzorokkal lehetséges a fotonszámlálást megoldani. Például nagy energiájú röntgensugarak (10 keV-nál nagyobb) [38] esetén sajátos CCD szenzorokat is használnak. Az irodalom alapján a küszöbmódszer segítségével több CCD szenzorból kapunk egy értéket, mégpedig úgy, hogy a beérkező energia függvényében a szenzorok felbontásával arányosan kapjuk meg a mért eredményt [39]. Mivel jelenleg (2021-es adatokat éve alapul) a piacon nem a QIS típusú szenzorok az elterjedtek általánosságban [40] és több CMOS mintsem CCD szenzor [41] érhető el; valamint, nem utolsósorban, a CMOS technológia fejlődésével egyre inkább elterjedtté válik olyan területeken is, melyeket eddig csak CCD szenzorok uraltak [42], így érdemes ezeket is megvizsgálnunk.

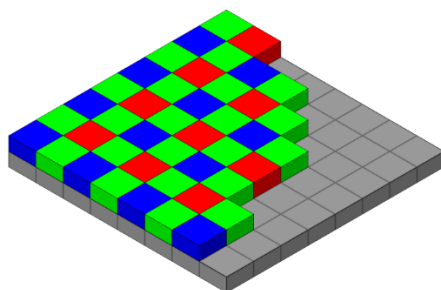
CMOS szenzorok esetén a túl kicsire csökkentett pixelek növelik a jel-zaj arányt, de egy adott pont után már nem növelik a felbontást. A pixelek méretének csökkentése növeli a fotonzajt, azaz a Planck fény láthatóságának valószínűségét. Az elmosódás, vagy Sommerfield effektus pedig a lencséknek köszönhetően születhet meg a Bayer szűrőkön [43].

A kamera kiválasztásánál több szempontot vettem figyelembe; olyan eszközre volt szükségem, melynek a dokumentációja elég kiterjedt és megfelelően elérhető, ugyanakkor felbontása magas és lehetőleg CCD szenzor, mivel az jobban megfelel a méréshez, mint a CMOS [44]. De sajnálatos módon CCD szenzorokhoz ritkán van jó minőségű elérhető dokumentáció, valamint egy dedikált fotonszámláló szenzor a célul kitűzött költségvetésen túlmutatna, így esett a választásom az 5MP OV5647 [45] CMOS típusú szenzorra, más néven, az rPi Cam 1.13-ra [46]. Az eszköz kiemelkedően jól dokumentált, elérhető, számos kész vagy félkész példakód is elérhető hozzá a dokumentációban is, emellett nem utolsósorban költséghatékony, valamint az egyik legfontosabb szempont teljesül, a képalkotás folyamatába belenyúlhatok, még egyenesen a szenzor nyers adataihoz férek hozzá, mindezt bármilyen visszafejtés, vagy „reverse engineering” nélkül, sőt, mi több, ugyanazt a Bayer szűrőt alkalmazza, mint a korábban tanulmányozott fotonszámláló mechanizmusok. Szintén előny a fentiek értelmében, hogy csak egy 5MP szenzorról van szó, így a zaj alacsonyabb lesz, mint más nyílt forráskódú dokumentált szenzorok esetén, melyeknél többnyire nagyobb felbontásról

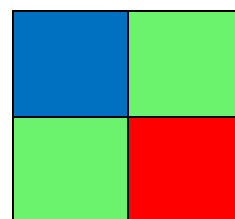
beszélhetünk [47] [48]. Ilyen típusú kamerával már korábban is készítettek mikroszkópot, még hozzá a submicron tartomány is észlelhető a segítségével, igaz teljesen más módszerek használatával [49].

A OV5647 szenzor képpalkotása és használata

A használt szenzor a fentebb már más szenzorok esetén is említett Bayer szűrőt [50] használ. Ahogy az alábbi ábrán látható, a szűrő sajátossága, hogy három különböző rétegben kerül mentésre három alapszín (ez csak jelen szenzor esetén igaz, más szenzorok, melyek szintén ezt a szűrőt használják ennél több vagy más színkiosztást is használnak, lásd RYYB Quad Bayer [51]). A különböző színeken egy-egy intenzitás kerül eltárolásra, amiken végig iterálva négyesével, azaz egy kék, egy zöld, majd ismét egy zöld és egy piros intenzitás mérésből alkotunk egy színes foltot, ahogy az alább látható, a mért arányoknak megfelelően. Megjegyzendő, hogy különböző algoritmus megoldások léteznek ezen a ponton, van, melyben a két zöld mérésből csak egyet használnak fel, van, ahol mindkettőt, súlyozva.



6. ábra - Bayer szűrő [52]



7. ábra - egy pixel nyers alkotóelemei, egy „jot”

Az eljárás, bár 1975 -ben lett levédetve, de számos jelenleg használt eszközben is előfordul, vagy épp módosítják, mint a Quad Bayer [53] vagy Nonacell CFA [54], így elavultnak sem nevezhető jelenleg.

A használt módszer

Az intenzitás méréshez kétféle módszert használhatunk, egyfelől az összes keletkezett pixel intenzitását is mérhetjük mértani közép segítségével, ahogy azt az (5) -ös egyenletben is láthatjuk

$$\sum_{x=1}^n \sum_{y=1}^m \sum_{z=1}^c \sqrt[3]{R + G + B} \quad (5)$$

Amelyben a következő változók szerepelnek:

- n, m a szkennelt objektum méretei;
- R, G, B a szkennelési színcsatornákon mért értékek pixelenként;
- c a szenzor pixelszáma.

A nyers mérésen, a pixelek megszületése előtt a Bayer szűrőt fényérzékeny szenzornak tekintve csupán az intenzitások mértékét figyelembe véve, azok

színcsatornáit figyelmen kívül hagyva is elkészíthetjük a mérésünk. Ezen kívül felmerülhet még, hogy szürkeárnyalatos képen végezzük el a fenti műveletet, vagy ne mértani közép segítségével számoljunk, hanem mátrixnak tekintve a képet, azt négyzetes mátrix alakra levágva determinánst számoljunk, a jotokat figyelmen kívül hagyva.

Első körben csupán a determinánsszámítás és az RGB képen vett mértani közép módszerét hasonlítottam össze. A determináns számításához a `numpy.linalg.slogdet` [55] függvényt használtam a túlcsordulás elleni védelem miatt. Ez az algoritmus a háttérben LU faktorizációt használ, így alkalmas nagyobb méretű mátrixokon is memória túlcsordulás nélkül számolni [56].

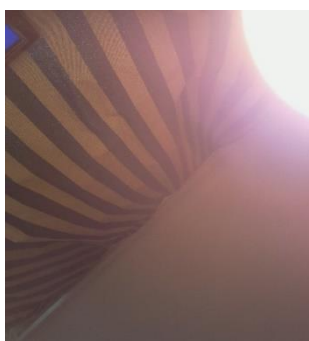
A mértani középhez azonban nem a fent mutatott gyökös képletet használtam, mivel az nem lett volna költséghatékony, a túlcsordulás veszélye is nagy, valamint túl kicsi értékek esetén az n -ed fokú gyök miatt [57], hanem a tízes alapú logaritmusok átlagával [58] számoltam, amit a (6) egyenlet mutat

$$e^{\frac{\sum_{i=1}^n \log(x_i)}{n}} \quad (6)$$

Amelyben a következő változók szerepelnek:

- x_i a mátrix elemei;
- n az elemek darabszáma.

A mátrix determináns értékének és a mértani középnek összehasonlítására egy 100+100 iterációból álló tesztet futtattam, ami összehasonlításra alkalmas. Az első 100 iteráció szobai nappali körülmények között történt, a második 100 iteráció közvetlen megvilágításnál. Ez alkalmas arra, hogy összehasonlítsuk, hogy a determináns vagy a mértani közép az, ami jelentősebb mértékben változik fény



8. ábra - megvilágított körülmények között készült kamera kép



9. ábra - természetes szobai megvilágításban készült kép



10. ábra - a mérés körülményei^{iv}

^{iv} A mért képek nyers Bayer adatokból lettek átalakítva, hozzáadott színintenzitás korrekciót nem tartalmaznak. A mérés eredményei a nyers Bayer adatokon futtatott értékek, nem pedig a képekből kerültek visszafejtésre!

hatására, valamint mekkora az ingadozás a zaj hatására. Ahogy az alább a hisztogramokból és dobozábrákból látható, nincsenek jelentős kiugrások a mérési eredmények között, így jelentős zaj egyik módszer esetén sem áll fenn. Az oszlopdiagrammokon viszont drasztikusan megjelenik a módszerek hatékonysága közti különbség. A fény intenzitása a mértani közép esetén látványosan jobb, mint a determinánsok használatával. Továbbá egyértelműen megjelenik a dobozdiagrammokon a skála is, ahol egyértelműen a determináns módszer dominál.

Összességében elmondható, hogy a determináns módszer bár erősebb mérési eredményekkel rendelkezik, de kevésbé érzékeny, robusztusabb a módosításokra, azaz a fény változását és a háttérzajt nehezebb elkülöníteni egymástól, tehát a mértani közép módszer az, ami megfelelőbben alkalmazható jelen esetünkben.

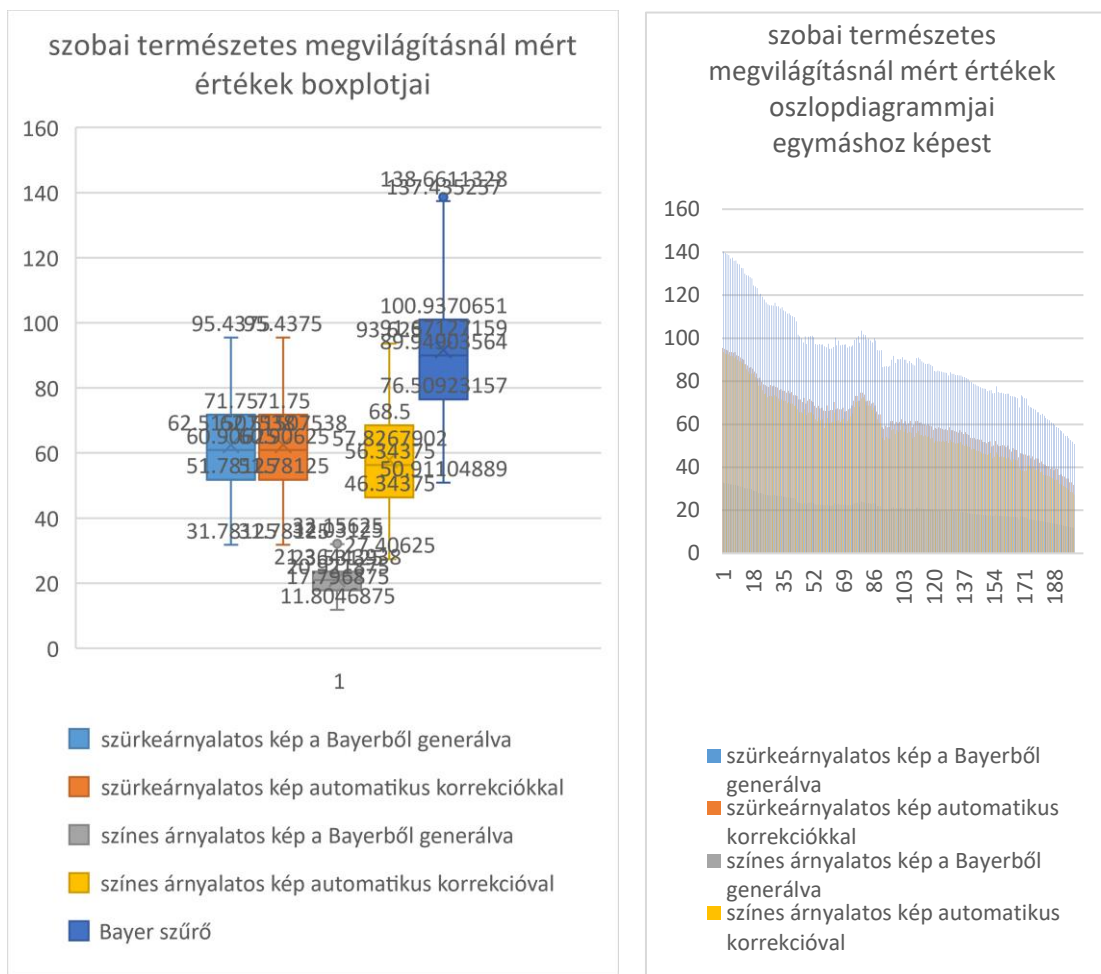
Ezt követően a nyers Bayer képből származó adatok mértani közepét, az RGB átalakítás utáni és szürke átalakítás utáni mértani közepeket hasonlítottam össze, úgy, hogy az RGB és szürkeárnyaltos átalakítást kétféleképpen is kiexportáltam, egyszer a nyers adatokból, egyszer a feljavított színtkorrekciózott képből. Ehhez 200 szobai normál megvilágítást vettem alapul és 200 közvetlen megvilágítást tartalmazó mérést.

Az alábbiakban, mikor színes képet említek, természetesen az RGB kombinációkra gondolok. Érdekességként megemlíteném, hogy a szobai természetes megvilágítás esetén jól látható az idő múlása is a méréseken, hiszen egyre csökken a fényerősség. A méréseket a késő délutáni órákban végeztem, ezért látványos ez a jelenség. Ugyanakkor a későbbi mérések esetén is változékony lehet az esetleges beszűrődő plusz fény, ezért a fenti ingadozás tekinthető releváns példának a mérések szempontjából.



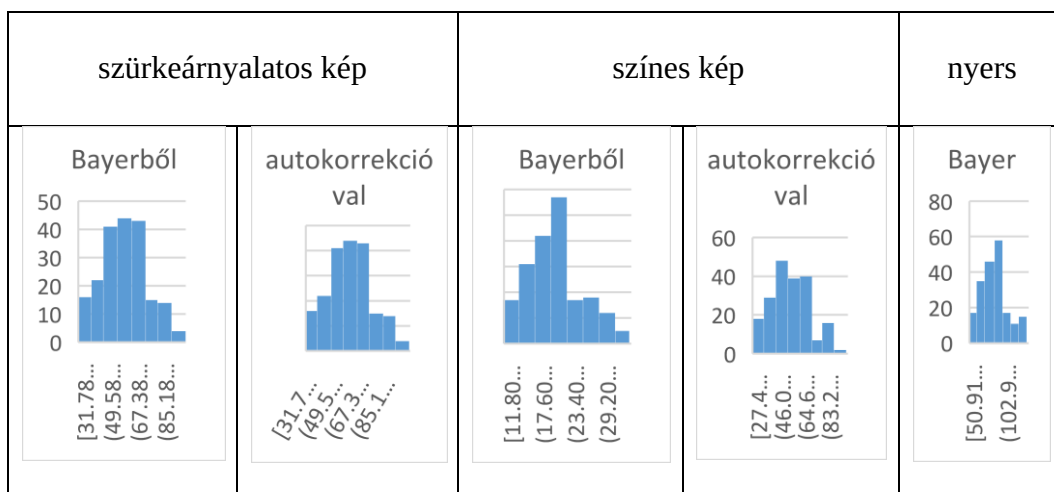
2. táblázat - mértani közép és determináns közti különbség összehasonlító táblázata a mérési eredmények alapján 100+100 iteráció eredményeként

Ahogy az alábbi ábrákból látható, a szobai természetes megvilágításokat (zaj) tekintve csupán elég nagy a kilengés az értékek között, valamint az is megfigyelhető, hogy ez a kép típusától függetlenül is igaz, hiszen megjelenik mind a szürke árnyaltos kép mindkét verziójánál, a színes kép mindkét verziójánál, valamint a nyers Bayer kép esetén is. Az összehasonlító oszlopdiagrammból pedig az látható, hogy nyers adatok a legerőteljesebb adatsorok, ezt követik az automatikus korrekciókkal kiexportált képek, majd a nyers Bayer adatokból kiexportált képek, mind a szürke mind a színes árnyalatok esetén.



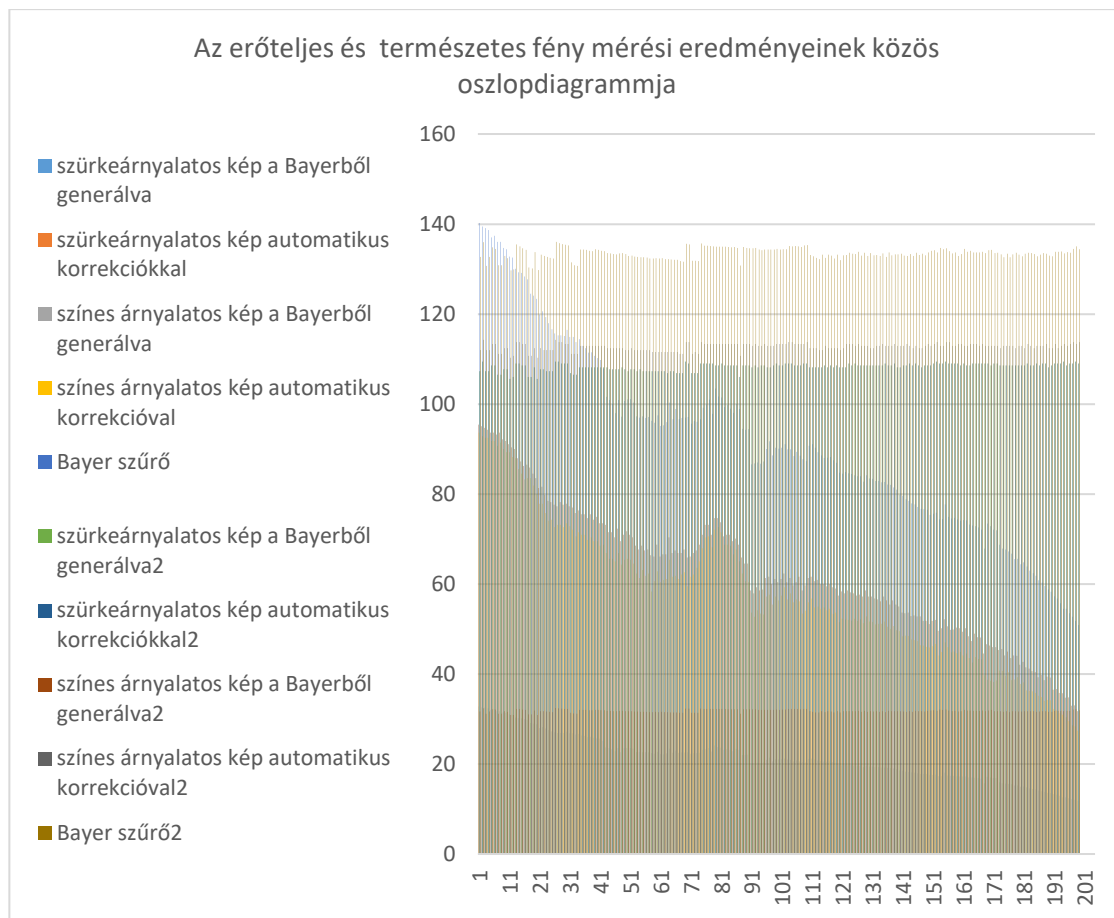
11. ábra - szobai mérések grafikonjai

Ugyanakkor ahogy az alábbi hisztogramokból látható a szürkeárnyaltos mérések egyenletesebb eloszlást mutatnak, mint a többi verzió, így ezeket érdemes figyelembe vennünk.



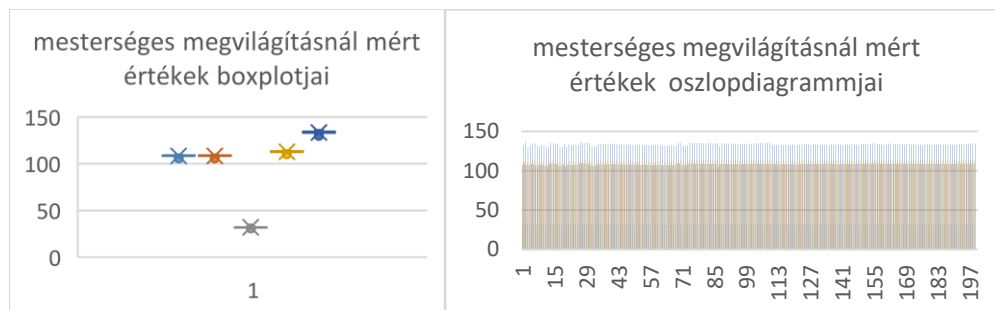
3. táblázat - szürkeárnyaltos, színes és nyers képből készült mérések összehasonlítása

Amennyiben összehasonlítjuk az erős fényhatással a mérés eredményeit, alább látható, hogy az erőteljes fényhatás jelentősen megjelenik az ábrán, jól elkülönülve.



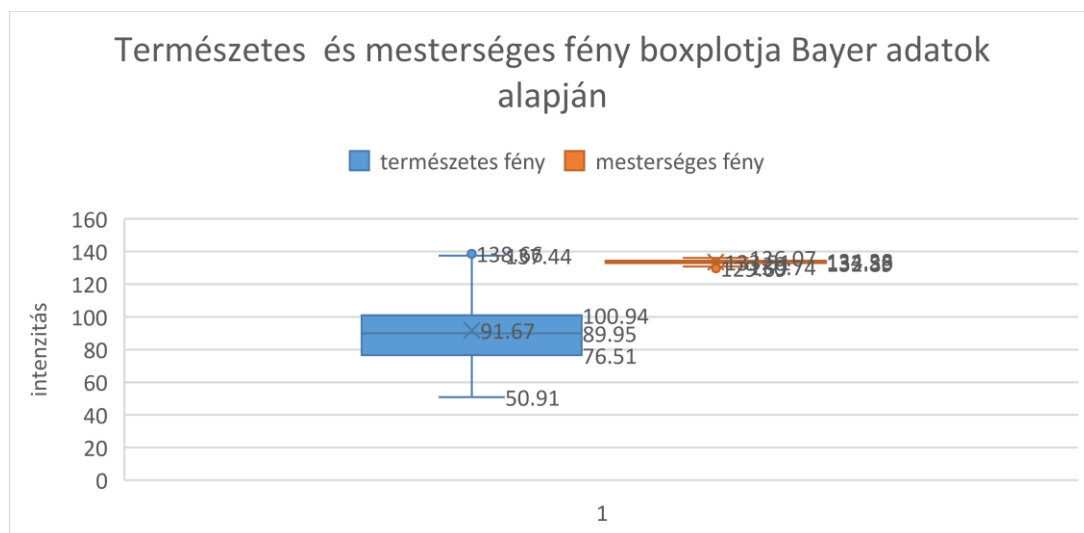
12. ábra - Az erőteljes és természetes fény mérési eredményeinek közös oszlopdiagrammja

Egymáshoz képest viszont a mesterséges megvilágítás esetén is a nyers Bayer adatok dominálnak, esetleg az auto-korrekciós színes kép emelendő még ki, mint lehetséges érdekes érték. De fontos észrevenni a boxploton, hogy sokkal homogénebb értékekről beszélünk, így egyértelműen jobban kivonható belőle a háttérzaj. A zaj szűrése ebben az esetben csupán két mátrix különbségét jelenti.



13. ábra - mesterséges megvilágítás mérési értékei

Összességében elmondható, hogy a két Bayer adatot érdemes használnunk, hiszen ezek a legrelevánsabbak, valamint itt a legnagyobb mértékben kimutatható változás, tehát a zaj szűrésére a legalkalmasabb. Ahogy alább látható, a két mérési eredmény összehasonlításából, a mesterséges fény sokkal kisebb tartományban található, kisebb mértékű outlierekkel mint a természetes fény mérései, ezáltal alkalmasabb az összehasonlításra, mint a többi verzió.



14. ábra - természetes és mesterséges fény összehasonlítása

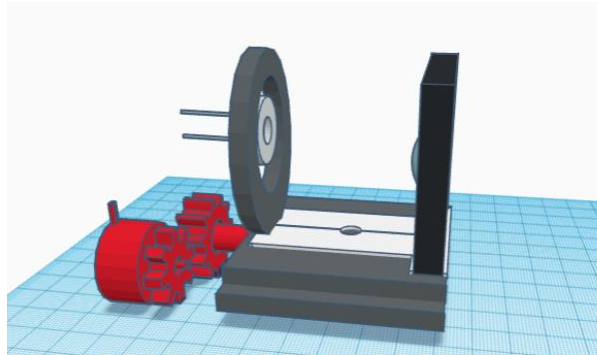
Fény intenzitás mérése lézer fény és fényérzékeny ellenállás segítségével

A másik módszer, ha fényérzékeny ellenállást használunk. Ekkor azonban a fény intenzitásának mérése csak akkor lehetséges, ha mindig pontosan a szenzoron fókuszált fényről van szó. Ez csak úgy történhet meg, ha a szenzort mozgatjuk mindig a megfelelő fókusztávolságba. Ekkor már gyakorlatilag a szenzor intenzitás értéke elhanyagolható és tekinthető csupán egy igaz/hamis állításnak, mint egy kapcsoló.

A szenzor mozgatásához ellenben egy áttétrendszerre van szükségünk, avagy szíjakkal való meghajtásra. A feladathoz egy optikai sínen helyezem el az utolsó lencsét, a pinhole-t és a szenzort, mert így ezek fókusztávolsága nem változik egymáshoz képest, csupán a mért tárgytól való tárgytávolságon változtatok a sínen való mozgatás állításával, tehát akkor lesz fókuszbán a szenzor, mikor a tárgytávolságunk megfelel, nem pedig a fókusztávolságunk.

Az áttét lehet akár közvetlen motor-tengely kapcsolat is, amennyiben rendelkezésünkre áll olyan motor, melynek nyomatéka és fordulatszáma megfelelő. Nekem nem állt rendelkezésemre ilyen motor, ezért egy S8BYJ-48 típusú léptetőmotorral szerettem volna megoldani a problémát. Természetesen léptető motorról lévén szó, a lépésköz kritikus lehet ebben a kérdésben, akár pont áttekerhet a lépésköz miatt a fókuszponton, így ezt kiküszöbölendő egy fogaskerék áttétre volt

szükségem. Ahogy az alábbi ábrán látható, a kérdéses áttételt fogaskerekekkel oldhatom meg, vagy szíj meghajtással. Fogaskerék esetén a kerekek átmérője és fogszáma a kritikus érték, míg szíj esetén csak a tárcsa mérete. A kettő kombinálását is használhatom.



15. ábra - Az optikai sín meghajtásához a pirossal kiemelt fogaskerék - motor -tengely kapcsolatra van szükség (készült a Tinkercad.com segítségével)

Amennyiben szíj meghajtás segítségével képzeljük el az áttétel megvalósítását, úgy azt a (7) egyenletben látható arányosságnak megfelelően lehet megtenni.

$$\frac{\text{motor fordulatszám}}{\text{szerszámtengely fordulatszám}} = \frac{\text{tengelyen lévő tárcsa átmérője}}{\text{motoron lévő tárcsa átmérője}} \quad (7)$$

azaz képletként [59] kifejezve a (8) -as egyenletben látható módon tehetjük meg.

$$\frac{n_m}{n_t} = \frac{d_t}{d_m} \quad (8)$$

A képletben:

- n_m a motor fordulatszáma;
- n_t a szerszámtengely fordulatszáma;
- d_t a szerszámtengelyen levő tárcsa átmérője;
- d_m a motor tengelyre szerelt tárcsa átmérője.

A (8) egyenlet segítségével megkaptuk a motor-tengely átmenetet, amihez szükséges a motor fordulatszámát és erejét hozzárendelnünk. A motor fordulatszáma 28BYJ-48 léptetőmotor esetén 12 RPM 9 Volt esetén és 6 RPM 5 Volt esetén [60]. A rendelkezésre álló optikai sínben [61] található menet paramétere 80 TPI azaz 80 menet van a csavaron inchenként [62], tehát egy inchet halad előre, ha 80-szor megtekerjük 360°-ban a tengelyt [63]. Tehát $1/80=0.0125$ inchet halad egyetlen teljes fordulattal járó tekerés hatására, ami 0.3175 mm. Feltételezve, hogy ezen távolságokon belül megtalálhatjuk a fókuszpontot és egy tekerés 1 sec alatt történik, egy perc alatt 60 tekerést ejthetünk meg tehát $\frac{6}{60} = \frac{1}{10}$

arányú átvitelre van szükségünk. Az alábbi táblázatban a kapott értékeket tüntettem fel a fenti képlet alapján, többféle motor és többféle tárcsaméret esetén.

Motor fordulatszáma (rpm)	$\frac{n_m}{n_t} = k$	Kapott eredmények						Tárcsa átmérő (mm)
		13.85	21.15	11.02	10.34	15.16	3.6	
6 ^v	0.1	138.5	211.5	110.2	103.4	151.6	36	d_m^{vi}
12 ^{vii}	0.2	69.25	105.75	55.1	51.7	75.8	18	
10000 ^{viii}	166.6667	0.0831	0.1269	0.06612	0.06204	0.09096	0.0216	
12100 ^{ix}	201.6667	0.068678	0.104876	0.054645	0.051273	0.075174	0.017851	
1660 ^x	27.66667	0.500602	0.764458	0.398313	0.373735	0.547952	0.13012	

4. táblázat - Szükséges tárcsa méretek kiszámítása pár meglévő tárcsa méretét és pár meglévő motor fordulatszámát alapul véve

Bár a 3.6-os tárcsaméret 12-es fordulatszámnál 18-as tárcsát igényelne a másik oldalon, ez közel áll a meglévő 15-ös tárcsához, de mégsem nevezhető pontosnak és a szíjítvitel másik problémáját, a csúszást nem oldja meg.

Ezért a közvetlen fogaskerék áttétel adhat kedvezőbb megoldást a problémára. Ehhez az áttétel mértékét kell kiszámolnunk, a (9). egyenletben látható módon.

$$\text{fogaskerek közti áttétel} = \frac{\text{vezérkerék fogszáma}}{\text{vezetett kerék fogszáma}} \quad (9)$$

Ez alapján [64] a (10) egyenletben foglaltak természetes átalakításnak tekinthetőek.

^v 28BYJ-48 5 Volt esetén

^{vi} $\frac{d_t}{k}$ alapján

^{vii} 28BYJ-48 9 Volt esetén

^{viii} RF130

^{ix} RF260 alsó érték

^x RF300CA 11440

$$\text{vezetett kerék fordulatszáma} = \frac{\text{vezető kerék fordulatszáma}}{\text{fogaskerekek közti áttétel}} \quad (10)$$

Amennyiben a korábban már bemutatott optikai sín segítségével kívánom meghajtani, úgy a vezetett kerék fordulatszáma 60 rpm továbbra is. A vezetéshez pedig a különböző, előzőekben felsorolt motorok fordulatszámát vehetem alapul. Fogaskerekek esetén viszont felmerül a másik kérdés is, miszerint mekkora erő kerül átadásra, mekkora lesz a nyomaték, ez befolyásolja a tengelyek távolságát egymástól [65], de erről később bővebben. Mivel csigák használatával kis fogszámú fogaskerekek is létrehozhatóak, tudva, hogy a csigák esetén a bekezdések száma adja a fogak számát [66], így ezek használatával akár köztes kerekek beillesztése nélkül is megoldható lehet az áttét kialakítása. Így például egy egyfogú csiga és egy 10 fogú fogaskerék pont ideális lehet az 5 Volttal hajtott 28BYJ-48 motor és a 60-as fordulatszámot igénylő optikai sín tengelye között. Amennyiben ennél kisebb sebesség is megfelelő, úgy növelhetjük a fogszámot.

Fogaskerék hajtás esetén a kívánt nyomaték csak megfelelő tengelytáv kialakítása után kerül átadásra, ezért ezzel is számolnunk kell. Mivel itt egy 1:2 vagy 1:1 átvitel valósul meg, attól függően, hogy 10 vagy húsz fog adott-e a fogaskeréken, ezért ez azt jelenti, hogy a fordulatszám elegendő lesz. A kerék és a csiga sugara 5 illetve 2.95 mm. Tehát a nyomaték a (11) képlettel [67] adható meg, ahol:

- M a nyomaték;
- F az erő, d a fogaskerék sugara.

$$M = \frac{F \cdot d}{2} \quad (11)$$

Átlagosan a fogaskerék áttétel hatásfoka 1-3% veszteséget könyvel el. Ebben az esetben, ha csigáról van szó, úgy nagyobb lesz az arány [68]. Ezért felmerülhet egy fogaskerék-fogaskerék áttétel is, mint megoldás a hatékonyság megőrzése érdekében. A fogaskerék áttétel általános törvénye [69] a (12) -ben bemutatott egyenletet jelenti.

$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{d_2}{d_1} = \frac{T_2}{T_1} = \frac{q_2}{q_1} \quad (12)$$

Amelyben a következők szerepelnek:

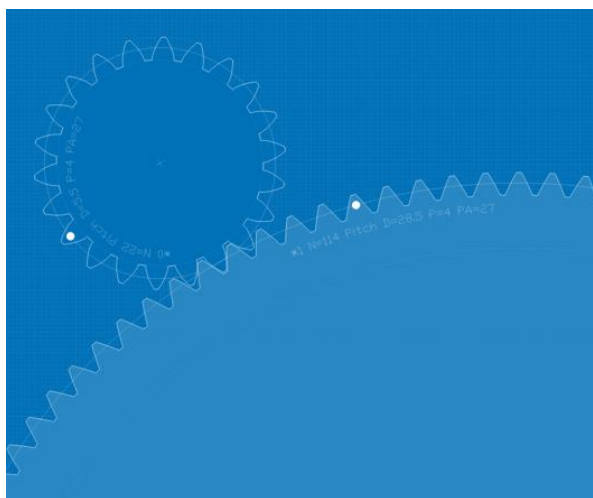
- $\omega_{1,2}$: szögsebességek (radian/sec);
- $n_{1,2}$: fordulatszám (rpm);
- $d_{1,2}$: fogaskerék átmérők, ahol az 1-es a vezető és 2-es a vezetett kerék (itt a mértékegységet szabadon választjuk, de annak hatása az egész rendszerre igaz lesz [70]);
- $T_{1,2}$: fogszám kerekenként;
- $q_{1,2}$ pedig a nyomaték, ahol 1-es a vezető, 2-es a vezetett.

Ennek fényében szerepeljen alább pár adat a rendelkezésre álló fogaskerekekből kiindulva. A táblázatban a korábban már használt motorokkal számoltam és a fogaskerekek adatain kívül minden a korábban már bemutatottokból származik.

gearing ratio	n1	n2	d1	d2	d2/d1	T1	T2	T2/T1	kerék-pár id
0.1	6 ^{xi}	60 ^{xii}	20	5.6	0.3	40	10	0.3	id1
0.2	12		10	5.6	0.6	20	10	0.5	id2
166.6666667	10000		40	10	0.3	81	20	0.2	id3
201.6666667	12100		24.7	18.7	0.8	48	36	0.8	id4
27.66666667	1660		24.7	5.6	0.2	48	10	0.2	id5
			18.7	23.78	1.3	36	46	1.3	id6
			28.7	5.6	0.2	94	10	0.1	id7
			16.8	21.8	1.3	31	43	1.4	id8
			14.84	40	2.7	28	81	2.9	id9
			19.89	5.6	0.3	38	10	0.3	id10
			28.7	12.73	0.4	94	23	0.2	id11

5. táblázat - mérési eredmények fogaskerék párok esetén, az eredmények a jobb átláthatóság kedvéért kerültek levágásra, a számítást Microsoft Excel segítségével végeztem (saját mérések)

Jól látszik, hogy egy 94 és egy 10-es fogszámú keréssel előidézhető még 28BYJ-48 léptetőmotorral akár 5 Volton is a kívánt fordulatszám, a megfelelő nyomatékkal. Így a továbbiakban ezt használtam.



16. ábra - a fogaskerék áttétel kapcsolatának modellje (készült a gargenerator.com [71] segítségével)

Ahogy az a korábban bemutatott hasonló szkennerek esetében feltűnt, az egyik legjelentősebb probléma a fix optikai felépítmények esetében az állvány. Az állvány kiválasztásának/megtervezésének legfontosabb paramétere az elérhető pontosság – ár arány volt, hiszen könnyű drága pontos állványt találni/alkotni,

^{xi} U.a. motorok, mint a korábbi táblázat esetén.

^{xii} A korábban már bemutatott okok miatt

ugyanakkor az optika mellett ez a másik fontos Achilles-sarka a projekt költségvetésének.

Alább a (6) táblázatban összefoglaltam az általam tapasztaltakat, saját véleményem, különböző szempontok alapján a különböző elérhető állványokkal kapcsolatban. Fontos elem volt a tartósság, a stabilitás és az elérhető mozgatási irányok a szkennelhető ágy mérete függvényében. Azaz, mekkora tárgyat, mintát lehet a segítségével beszkenneelni. Tartósság szempontjából a gyorsan kopó alkatrészek mennyisége és azok cserélhetőségének nehézsége volt a kérdéses.

Értékelési szempontok	Openflexure - Delta Stage	Openflexure - Mikroszkóp	Markus állványa
Stabilitás	Robosztus	Stabilitását a tengely mozgató gumi befolyásolja	Plusz lábakkal akár szintezni is lehet, de önmagában robosztus
Továbbfejlesztés	Kis mértékben, csak motor adható hozzá	Az optika egyáltalán nem fejleszthető az eredeti elképzeléseket követve.	Továbbfejlesztés szükséges, ehhez számos lehetőség adott, például a szabvány csavar méretű lyukak
Továbbfejlesztés szükségességének mértéke	Az optikai rendszer az eredeti elképzelések szerint nem illeszthető, tehát ez teljes mértékben szükséges. A mozgatás motorizálása szintén, ugyanakkor arra van tervezett megoldás, ami viszont nem veszi figyelembe a beépített gumi tulajdonságait		A teljes optikai rendszer helye, felépítménye hiányzik, valamint a mozgatás nem motorizált
Karbantarthatóság	A beépített gumik miatt rendszeres karbantartást igényel, ezek cseréje nehézkes, az átlagfelhasználó akár nem is tudja elvégezni	A felépítmény sajátossága, hogy a tengelyek mozgatását végző gumik találkoznak a környezettel így azok még gyakoribb karbantartást igényelnek, mint a delta stage esetében	A forgó alkatrészek olajozása szükséges a használat mennyiségétől függően.
Tartósság	Robosztus, de vannak beépített mozgó 3D nyomtatott elemek, melyek a nyomtatás minőségétől függenek. A gumigyűrűk pedig szintén nem kedvezőek		A 3D nyomtatási alapanyag függvénye csupán.

Terhel- hetőség	Maximum egy mintát tud egyszerre szkennelni	Több minta, kb. 3-5 szkennelése is lehetséges
Mozga- tási irányok	X, Y, Z irányban	Csak X, Y irányban

6. táblázat - Kipróbált mikroszkópállványok összehasonlítása

A feladat szempontjából el kellett érnem, hogy programozottan vezérelhető legyen, ezért ki kellett egészítenem léptető motorokkal a tengelyek meghajtásához. Ez azt jelenti, hogy a motorok számára egy tengely-motor átvitelt is meg kellett oldani, valamint a motor rögzítését is az állványhoz. Továbbá, a beépített hardver elemek minőségétől szerettem volna a lehető leginkább függetleníteni a rendszert, hogy azok későbbi, utólagos cseréje ne hozza magával szükségszerűen a beépített elemek többségének cseréjét. Ezért a meghajtás vezérlésének tervezésekor végálláskapcsolókat építettem be, amikhez szintén szükség volt egy tartó-, illetve azokat jelző rendszerre.

A pontosság növelése érdekében az általam elérhető, lehető legkisebb menetszámú menetes szárat választottam tengelynek. Ez egyben a rendszer pontosságának sarkalatos kérdése, hiszen, ha alacsonyabb menetszám elérhető, akkor képesek leszünk kisebb lépésközzel pásztázni, aminek hatására pontosabb és szebb végeredmény érhető el.

Ehhez, ahogy alább látható az ER diagrammon, az állványvezérlés tervezésekor igyekeztem az objektum orientált fejlesztés szabályait figyelembe tartani. A fényerősség méréseket [72] és a fényforrás bekapcsolását [73] az rPI oldalán megoldva a GPIO portok segítségével.

Egy mérés a terv szerint kétféleképpen történhet. Egyik szkennelési mód a folyamatos, mikor a kapott mérési eredményeket eltároljuk egy listában, amíg egy soron végig nem ér az ágymozgatás, természetesen a méréshez szükséges trashold időtartamot beleszámolva, ami rontja a kapott eredményt. Ezután az ág lép a lehető legkisebb mértékben egyet az Y tengelyen, majd ellentétes irányban ugyanez lejátszódik. A kapott eredményeket szintén egy listában tároljuk, majd az utóbbi listát invertáljuk és így fűzzük egybe a listákat, listák-listáját alkotva. Ezt ismétljük addig, míg, az Y tengely végét jelző leálláskapcsolót el nem érjük.

Másik alkalmazható módszer a lassú szkennelés, mikor, minden egyes méréshez megáll az ágymozgatás, majd a mérés végének jelzése után továbbhalad. Ezt ismétli a sor végéig, ahogy az előző módszer, úgy ez is invertálja minden második sor ellentétes

irányban való mozgatás során mért adatsorát, majd egybefűzi, miután, az Y tengely végére ér.

Természetesen van lehetőség A-szken futtatására is, amikor csak egyetlen sort szkennelnünk be és azt ábrázoljuk akár mint oszlopdiagram. A szkennelést elvégezhetjük kis lépésekkel ahogy azt fentebb kifejtettem, illetve nagyobb lépésekkel. A lépésköz a motor – tengely lépésarányán alapul a nagy lépések esetén, azaz, megmondjuk, hány kis lépésből álljon az egy nagyobb, ekkor a kis lépések számát lépésköznek nevezzük. A beállításokra a soros porton van lehetőség a megfelelő parancsok kiadásával. Erről bővebben az állvány felhasználása fejezetben.

Az adatvizualizációhoz, bár kész, létező programokat [74], scripteket [75], [76] is használhattam volna, mégis inkább Python segédcsomagok mellett döntöttem. Seaborn [77] vagy Matplotlib [78] csomag segítségével a mátrixokat, amik létrejönnek a szkennelés alatt 2D, hő térképpé alakíthatjuk, amit, értelemszerűen valamilyen közel tetszőleges képformátummá exportálhatunk. Ugyanebből az adathalmazból 3D felületet [79] is létrehozhatunk vizualizációval [80], ahol a felület magassági értékét azonosítjuk a mérési értékkel. Ezek ugyan pontszerű értékek és pontszerűen tudjuk vizualizálni is, de a pontok összekötésével teljes felületet kaphatunk. Ugyanezen adatokból surf2stl [81] script segítségével akár kinyomtatható kiterjesztésű 3D modellé lehet alakítani, ezt a modellt nem csak kinyomtathatjuk, hanem akár VR-ben is megjeleníthetjük.

A vezérlés konzolosan történhet, ekkor használhatunk valamilyen soros port kommunikációra alkalmas segédprogramot, vagy esetleg egy egyszerű segédscriptet, melynél ajánlott a be- és kifelé történő kommunikációt külön szálon kezelni.

Fejlesztés

Felhasználási lehetőségek (Use-Case)

A tervezést követően a mikroszkópra vonatkozóan a következő felhasználási esetek kerültek megállapításra: szkennelés indítása, lassú szkennelés, állvány inicializálás, automatikus szkennelés, vizualizációk. A fenti listából a szkennelés indítása, lassú szkennelés, automatikus szkennelés, állvány inicializálás olyan funkciók melyek az állványvezérlő áramkörrel elvégezhetőek külön is, későbbi, esetleges külön felhasználás esetén az állvánnyal soros USB porton [82] át a megfelelő utasításokkal. Ezek az állvány újra felhasználhatóságát, projektől függetlenítését célozzák meg. A szkennelés leállítása mind a parancs segítségével, mind egy vészleállító gombbal megoldható, mindkét esetben az aktuálisan futó program leáll. A stage inicializálása során a használt állvány méreteit állapíthatjuk meg, annak függvényében, hogy mekkora menetszámmal rendelkezik a beépített tengely, ugyanis ekkor annak az értékét kapjuk meg, hogy hány fordulatot kellett megtegyen a tengely, amíg végálláskapcsolótól-végálláskapcsolóig ért X és Y tengelyen.

Az automata szkennelés során a mérés folyamatos, annak pontossága viszont alacsony és nagyban függ a használt feldolgozó hardwarétól, esetünkben az rPI-től.

Lassú szkennelés során minden egyes mérés után történik a mozgatás. Így a mérések pontosabbak, kevesebb pont maradhat ki esetlegesen lassú órajel miatt, ugyanakkor a gyakori rPI-ESP szinkronizálás miatt jelentősen lassabb, mint az automata szkennelés.

A vizualizációk, 2D és 3D lehetségesek akár korábban mentett adatsorokból is és természetesen képként vagy 3D modell fájlként exportálhatóak, ugyanakkor a vizualizáció során interaktív felületen kezelhetőek a megjelenített adatok.

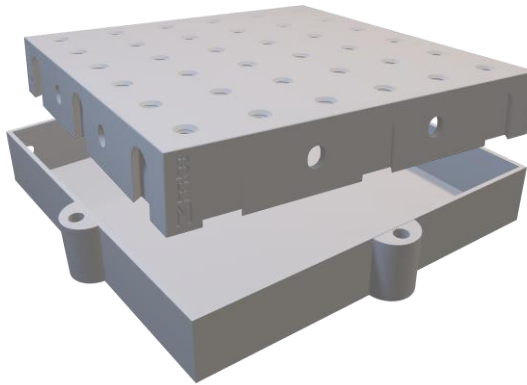
3.1. Az optikai rendszer

Az optika egy előre megtervezett, optikai asztalon felépített és kipróbált rendszert kellett tartalmazzon. Ahogy az alábbi ábrán látható a standard optikai elemeket felhasználva építettem meg és próbáltam ki a fent bemutatott tervezett optikai rendszert.

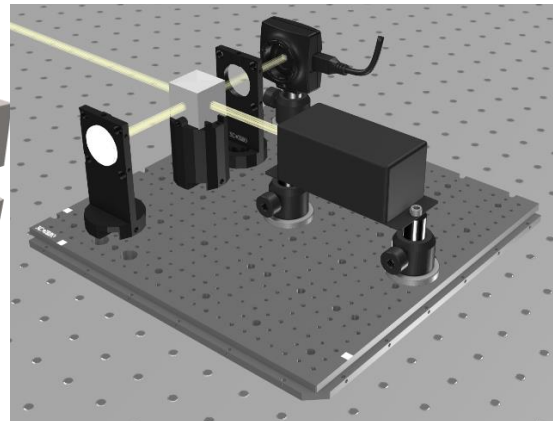


17. ábra - az optikai rendszer a próba asztalon felépítve - saját kép

Ehhez egy tartóelemet alkottam, egyfelől a tartására, másfelől az elemek védelmére. Az optika tartó állványa egy beépített optikai asztal részletet tartalmaz, így



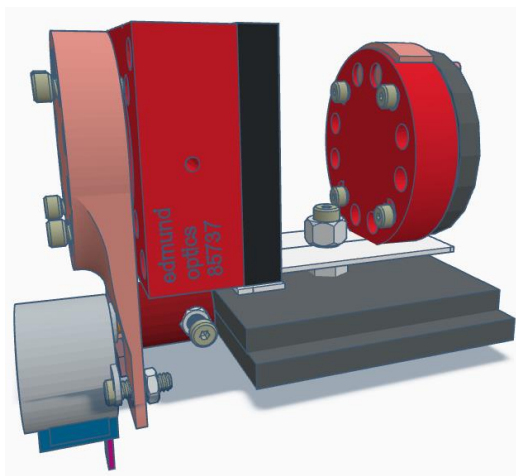
18. ábra - Az optika tartóeleme. Az optikai asztal részletének forrása Brenda, a thingiverse.com-ról [83] annak tartóelemét a tinkercad.com webapp, Autodesk Fusion360 és Cura segítségével készítettem.



19. ábra - az optika tartóba beszerelendő optika terve. Készült a 3D OPTIX webalkalmazás segítségével

könnyebb és gyorsabb volt az átállítás a próba felszerelésről a tényleges optikai szerkezetbe. A terv szerint egy az egyben építettem át a fenti rendszert az alábbi panelbe.

Az optikai rendszer, ahogy azt korábban vázoltam a tervezés során, áll egy fényforrásból, egy fényérzékeny ellenállásból és köztük egy 50/50-es beam splitterből, egy 10mm-es pinhole-ból. Ezek felfüggesztésére pár segédelemre szintén szükség volt az asztalon található lyukak távolságköze miatt. Az optika kimeneti pontjait - mint a tárgylemez vagy a fényforrás és fényerősség mérő kábelezésének elvezetése - utólag, az összeszerelést követően adtam hozzá a modellhez, hogy a porosodás lehetőségét minimálisra csökkentsem az esetleges eltúlzott méretű lyukakkal. Az optika elektronikáját teljes mértékben az rPI kezeli, felhasználva még egy 1K Ohmos ellenállást és 250V-os kondenzátort a fényerősség mérésére és egy rPICAMv2.2-t a méréshez, valamint hasonlóan a fény kibocsátására.



20. ábra - a fókuszkereső saját tervezésű alkatrészei a piros különböző árnyalataival kiemelve. Ezek: eo85737 kompatibilis lencsetartónak is alkalmas távtartó; eo85632 kompatibilis rPICAM tartó, ennek kiegészítője; eo85632 és eo85737 kompatibilis léptetőmotor tartó; eo0.125" Travel, X Axis tengely kompatibilis léptetőmotor-tengely kapcsolat

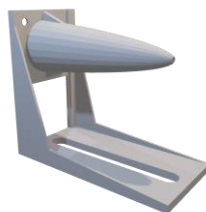


21. ábra - a fókuszkereső a valóságban

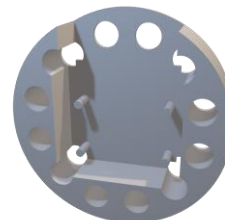
Ezen kívül még szükség volt egy eo85737 kompatibilis tartóra, egy optikai asztal kiegészítésre és egy állítható magasságú fénysugár gyűjtőre mely párhuzamosan engedi ki a fénysugarakat a fényforrás felől. A szükséges alkatrészeket bonyolultságtól függően Autodesk Tinkercadben vagy Autodesk Fusion360-ban készítettem el.



22. ábra - eo85737 távolságtartó, készült Autodesk Fusion360-ban - saját kép



23. ábra - fénysugár gyűjtő készült Autodesk Tinkercadben- saját kép

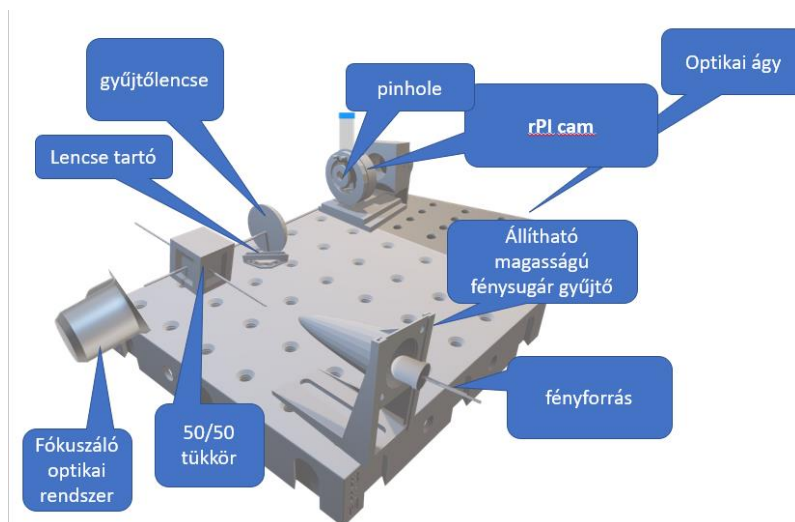


24. ábra - rPICAM tartó, készült Autodesk Fusion360-ban - saját kép

Ezek az eszközök természetesen részben a felhasznált lencsékhez kötött tulajdonságú eszközök, de mindazonáltal próbáltam általánosítani, ezért például a fénynyaláb gyűjtő esetében a fényforrás fényességéhez ugyan kötött a mérete, de a használt lencsetartó magasságához csak részben, hiszen állítható magasságúnak készült, azaz két részből áll, egy sínben fut a fénynyalábot gyűjtő kúp, melyre egy lapra rögzítve kerül fel a fényforrás.

A kiegészítő optikai-asztal részletben ugyanakkor sűrűbben helyeztem el rögzítési pontokat, mivel így több lehetőséget biztosít a felfogatásra. Ez nem szabvány optikai asztal méret, de kevesebb előre gyártott elemet igényel a tesztelés során ez a megoldás. A két optikai ág összefogatását az ág síkjával párhuzamosan, az ágyban átfutó előre elhelyezett csavarmenetekkel biztosítottam.

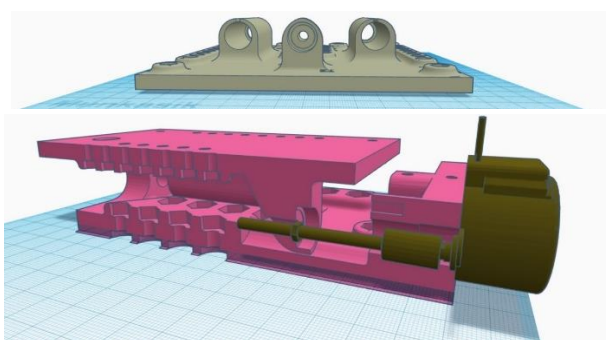
A teljes felépítmény az alábbi képen látható.



25. ábra - az optika teljes modellje

3.2. Az állvány elemei

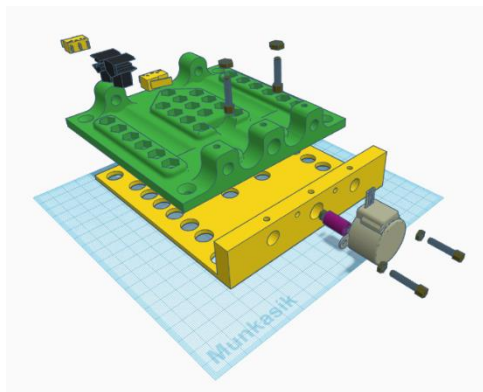
A Markus féle állvány [84] továbbfejlesztése során az alábbi mikroszkóp állványhoz jutottam el, melyhez szükség volt a motor tartására szolgáló elemre, a motor-tengely átmenetet képviselő elemre, valamint a végálláskapcsolókat tartó elemekre, valamint változtatásokra is szükség volt, mivel az eredeti koncepció ezt az állványt egy kifelé tekeredő menetes szárral, vagy ahhoz hasonló eszközzel hajtotta volna meg, ami a motor meghajtás miatt nem volt megfelelő számomra. Ezért a felső elemeket minden szinten módosítanom kellett az állványban a tengely számára megfelelő méretű furattal.



26. ábra - A módosítás az állványon (felül) és a mozgató mechanikájának keresztmetszeti ábrája (alul) ahol az állvány rózsaszín és a tárgyalt mechanika barna. Készült a Autodesk Tinkercad webapp segítségével.

Az eredetivel ellentétben továbbá épp ezért itt nem egy csapágy tartja a felső elemben a tengelyt, hanem egy menet, melyben foroghat a menetesszár. Ez a menet a felső elemhez rögzített, ezért nem tud forogni és hagyja a tengelyt forogni a menetben, ezáltal garantálva az állvány pontosságát. A másik oldalon a motor fixen maradhat, annak tengelyére rögzített motor-tengely átmenettel lehet a tengely forgatását biztosítani. A tengely a motor-tengely átmenetbe rögzített (jelen esetben ragasztott, bár nem ez a legjobb megoldás hosszútávon), ezért a hátrafele forgatáskor nem tud az átmenetbe rögzített menet (anya) letekeredni.

Az eredeti állványban a tengely szorosságát rugók adják. Mivel itt kis elemeket szeretnénk mozgatni és nagy az állvány önsúlya ezért úgy gondoltam, elég lesz gumik használata is rugók helyett.

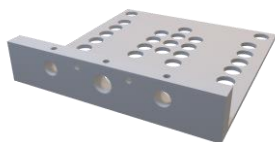


27. ábra - Az alsó réteg robbantott ábrája. (A modellhez felhasználtam design elemként a léptető motor, csavarok és a kapcsolók modelljeit, valamint Markus állványát vettem alapul; a modelleket Autodesk Tinkercad és Autodesk Fusion360 segítségével készítettem)

Az oldalsó menetekre továbbra is az ágy dőlésszögét tudjuk korrigálni és pontosítani, mint az eredeti modell esetén.

A motor-tartó elemet az erőhatások miatt robusztusnak terveztem, ezért a meglévő alapra ráerősítve képes az egyenáramú motor rögzítésére, épp ezért leköveti a meglévő alap összes furatának helyét.

A végálláskapcsolók tartóelemeinek a Markus féle állványba [85] illeszkedve kellett egy végálláskapcsolót és annak kábelezését tartaniuk, ugyanakkor függőlegesen egy ilyen kapcsoló nem fért volna el, ezért vízszintesen állítottam be, úgy, hogy a tartóelem egy hatszögletű anya méretével megegyező lábbal rendelkezzen és magassága csak a szükségesre korlátozódjon.

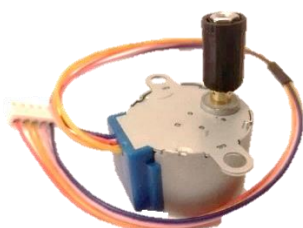


28. ábra - a motor tartóeleme, avagy az "Emmentáli" ahogy a kollégák jellemezték a sárga filament és lyukas formája okán. (Készült az Autodesk Tinkercad webapp és Autodesk Fusion360 segítségével)



29. ábra - leálláskapcsoló tartóeleme. (Készült az Autodesk Tinkercad webapp segítségével)

A motor-tengely átmenetnél a tengelyt egy rögzített anya segítségével szerettem volna meghajtani, ezért az egyik oldalon annak alakítottam ki megfelelő helyet, míg a másikon a motor tengelyének megfelelő bemeneti nyílást hagytam. Az anyát utólag beragasztottam az elembe ragasztó és - az elem falának enyhé meglágyításával - hő hatására.

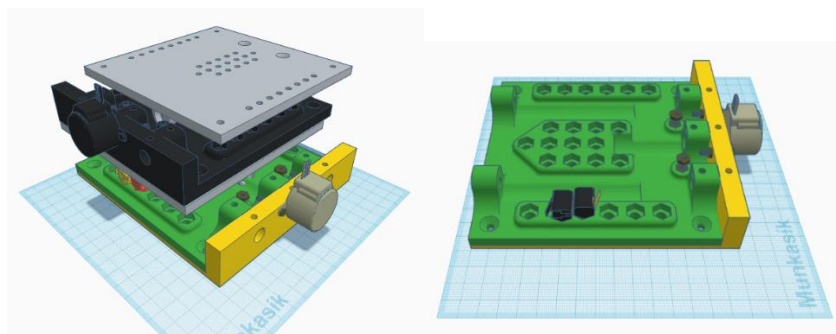


30. ábra - a tervezett motor - tengely átmenet összeszerelve



31. ábra - a motor - tengely kapcsolatot végző elem keresztmetszeti modellje. (készült az Autodesk Tinkercad webapp segítségével)

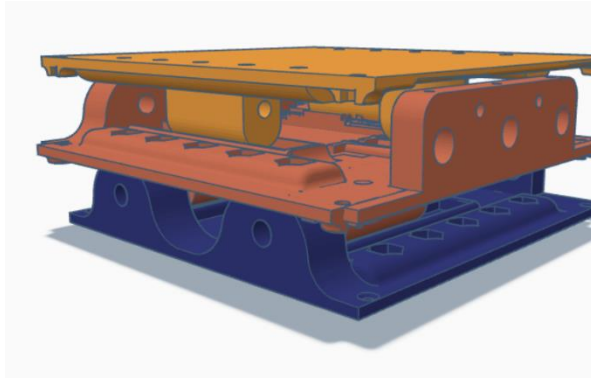
A végeredmény összességében az alábbi állvány lett, immár motorral és leálláskapcsolóval felszerelve.



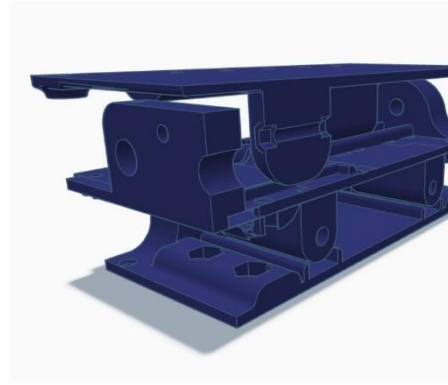
32. ábra - Az állvány kiegészített terve, felszerelve a motorral és a leállás-szabályozó kapcsolókkal. Bal oldalon a teljes állvány, jobb oldalon az alsó réteg kibontva. Az X és Y tengely irányában ugyanaz a szerkezet csak 90°al elfordítva. (A modellhez felhasználtam design elemként a léptető motor [86], csavarok [87] és a kapcsolók modelljeit [88] valamint Markus állványát [89] vettem alapul; a modelleket Autodesk Tinkercad webapp és Autodesk Fusion360 segítségével készítettem)

Ekkor azonban egy új problémával szembesültem, mégpedig, hogy az általam használni kívánt 28BYJ-48 típusú motorok segítségével ezt az állványt nem lehet elég pontosan és elegendő sebességgel mozgatni, pusztán a súlya miatt sem. Azaz, túl kevés a motorok nyomatéka. Mivel nem szerettem volna a meghajtáshoz átviteli

fogaskerékrendszer tervezni ezért inkább könnyítettem az állvány súlyán, mégpedig úgy, hogy a fenti konstrukciót alapul véve készítettem egy saját modellt, melyben a különböző különálló részeket - melyeket itt össze kellett szerelni - egy-egy elemként oldottam meg. Ez azt eredményezte, hogy 15%-os kitöltöttségen nyomtatva, kispórolva a csapágyrendszer teljesen, a középső szintet egyetlen elemként megszerkesztve és kinyomtatva már képes volt a motor kezelni az új feladatot.



33. ábra - Az általam újratervezett állvány modellje. A három különböző szín a mindössze három különböző elemet különíti el melyből áll az állvány (a tengelyek és a meghajtás nélkül). A modell az Autodesk Fusion360 segítségével készült

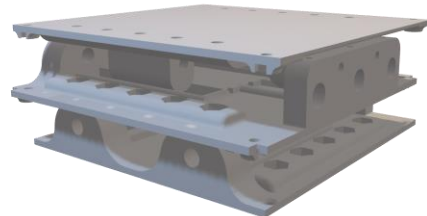


34. ábra - az általam tervezett állvány metszeti képe, amin jól látszik a meghajtáshoz kialakított hely

Ennek segítségével oldottam meg a pásztázást. A fent kifejtett optikai rendszer fix maradt, az állvány fölé hajol, a mintát az állvány felső elemére helyezve tudunk szkennelni, ahogy az alább a 3D modellen látható.



35. ábra - Egyben az optikatartó, az állvány és annak meghajtása, a korábban már bemutatott és felhasznált design objektumokkal.



36. ábra - Átdolgozott saját tervezésű állvány 3D modellje - Autodesk Fusion360 segítségével készült

Az új állvány immár teljes egészében saját tervezés volt, a meghajtásának módja a korábbival megegyező volt, azzal a különbséggel, hogy kihagytam belőle a legnehezebb elemeket, a csapágyakat. Az egész állvány 3D nyomtatott elemekből áll és csak két oldalsó tengelyt örökölt meg az előző verzióból, melyek a különböző szinten található elemek kiszíntezésére szolgálnak, hogy a megfelelő síkba való beállítást elősegítse. A motorok meghajtása maradt a korábbival megegyező, illetve

egy plusz menet került beültetésre a kifejezetten ennek kialakított helyre a tengelyekhez a meghajtás pontosságának és a motorok túlterhelésének csökkentése érdekében.

Mivel az új állványt már kifejezetten a motorokhoz terveztem, így a korábbi Markus féle állványhoz hozzáadott, általam tervezett kiegészítő elemeket már beépítettem és természetesen a tervezéshez Markus állványát használtam fel.

Markus állványa és a saját tervezésű állványom összehasonlítása		
<i>(minden a korábban bemutatott meghajtással értendő)</i>	Markus féle	Saját átdolgozás
sebesség	-	≈ 2.2 sec/lépés
Asztal méret	14 x 14 cm	15 x 14 cm
Össztömeg	983 g	519 g
Legkisebb mérhető lépéstávolság	-	≈ 0.00005 mm/lépés
Gyorsan kopó alkatrészek száma	4	0

7. táblázat - megépített és továbbfejlesztett állványok összehasonlítása

3.3. Állványkezelő áramkör

Az állvány vezérlését egy ESP32-WROVER B és két easydriver v4.4 [90] segítségével oldottam meg, az alább látható módon. Mivel korábban még nem készítettem áramkört sem és mikrokontrollerek vezérlése terén se rendelkezem tapasztalattal, így a kihívás adott volt.

A mikrokontrollerhez használt easydriver v4.4 két input jelet vár és négy jelet ad ki, mivel a 28BYJ-48 léptetőmotor [91] öt bemenetéből az egyiken vagy mindig vagy soha nem megy át feszültség.

A motorvezérlőket külön 5V-os táppal szükséges ellátni, mivel a motor maga is innen kap áramot, nem csak a vezérlés történik innen [92]. Így az egyik bemeneti lábon a forgatás irányát adjuk meg, a másikon pedig azt, hogy forogjon-e. A lépéseket mi magunk határozzuk meg, hogy mennyi ideig tartanak, tehát értelemszerűen a lépés által forgatott távolság az maga lesz a motorra kötött tengely paramétere, az átmérő vagy menetes szár esetén - mint ez esetben is - a menet emelkedése.

Az állványt kezelő ESP továbbá kezel még öt gombot, amiből négy végálláskapcsoló. A végálláskapcsolók állapota a motor forgatásakor kérdéses, ugyanis azért, hogy a vezérlő áramkör és a program független legyen a beépített hardware elemek pontosságától (amit nagyban befolyásol nem csak a beszerezhető alapanyagok minősége, de például a 3D nyomtatott elemek esetén a nyomtatás minősége és ezért a nyomtató pontosságai-paraméterei is), ezért nem a tengely

paramétereikhez igazítottam a forgatás idejét, hanem a vezérlő mikrokontroller órajeléhez és a végálláskapcsolók állapotához. A kapcsolók akkor aktiválódnak, ha az adott tengely a végéhez ért és az állvány paramétereik nem engedik tovább. A végálláskapcsolók három lába közül szintén elég kettőt használni [93]. Az, hogy melyik kettőt használjuk az saját választás kérdése, annak függvényében, hogy mit szeretnénk kapcsolni, mikor váltson feszültséget, mikor le van nyomva vagy mikor épp nem [94]. Én a C – NC lábakat, azaz a „common” és „normally closed” lábakat választottam, mivel azt szerettem volna, hogy akkor adjanak jelet, mikor le vannak nyomva. Értelemszerűen a program inverz módon is felépíthető, csupán konvenció kérdése, mit tartunk alapértelmezett értéknek. Az ötödik kapcsoló a vészleállító gomb, mely az állványon futó programot állítja le. Az ESP egy USB kapcsolattal kap tápáramot is és vezérlést [95] is. Kimeneti lábainak GPIO lábait kell használni és kényelmi okokból az „Analog to Digital Converter” lábait használtam. Így az esetleges jelátalakításokkal kiolvasáskor vagy íráskor [96] nem kellett foglalkoznom, például a végálláskapcsolók esetében ez kényes kérdés [97].

Az rPI a fény vezérlése során és a mérések végzésekor az rPI GPIO portjain keresztül vezéreltem mind a fényforrást [98] mind pedig a fényérzékeny ellenállást [99], ahogy ez az alábbi kapcsolási rajzon is látható, mely az első általam készített kapcsolási rajz. Az rPI és a léptetőmotorok külön tápot igényelnek, mivel egyszerre nem tud a motor is és az rPI is működni 5V feszültségről.

 37. ábra - áramerősség mérési pont az elvárt értékkel jel az áramkörön. Készült az EasyEDA segítségével	Mérési pont	Nominális feszültség
	Motorvezérlő – bemeneti feszültség	4-5V
	Motorvezérlő jeláram	1.4+V
	Végállás kapcsolók jelára	Min 1.4 - 2 V ha van jel

8. táblázat - táblázatba gyűjtve a hibakeresési helyek mérési paramétereit

Az áramkör összeszereléséhez mérési pontokat iktattam be, hogy a hibakeresést megkönnyítsék, ezeken a motorvezérlők és a motorok, valamint a motorvezérlők és mikrokontroller közti kapcsolatot lehet vizsgálni, ha bármi nem az elvártakkal egyezően működne. Ahogy az a (8) -as táblázatban látható többnyire az áramerősséget adom meg, vagy értéket, vagy egy tartományt, melyben elfogadható.

3.4. Az áramkör vezérlése ESP32 alapon

Az ESP vezérlését Arduino illetve C/C++ nyelven valósítottam meg. A motorok pontosabb és dinamikusabb vezérléséhez a kézi vezérlés helyett az AccelStepper segédkönyvtár használatát vezettem be. Természetesen benn hagytam a lehetőségét annak, ha a felhasználó szeretné akár manuálisan lépésenként irányítani az eszközt, ezt a soros porti kommunikációban a “w”, “a”, “s”, “d” betűk elküldésével meg is

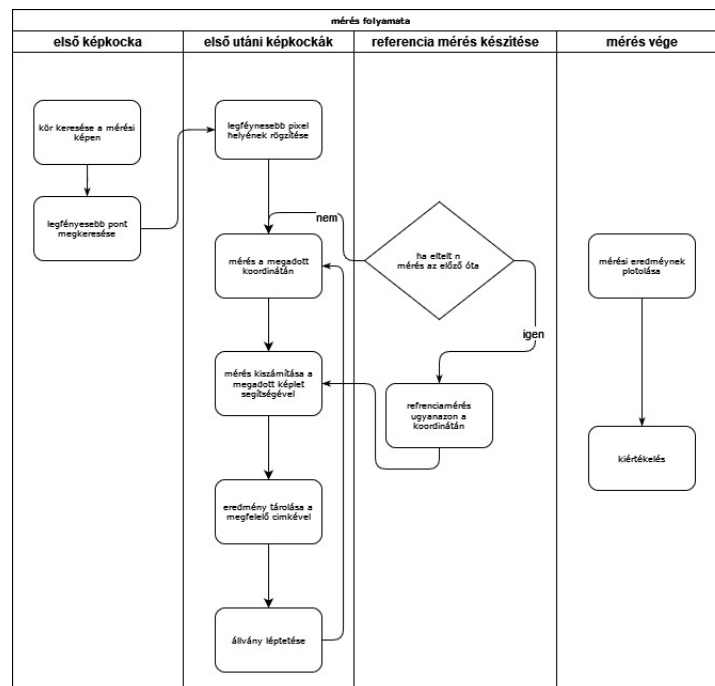
A kliens esetén fontos a megfelelő késleltetés használata, az egyetlen lépések használata esetén, jelen esetben ez 100ms, de erről gondoskodik a beágyazott rendszer is, hiszen ennél rövidebb időközönként nem fogad bemeneti adatot, ugyanakkor egy helytelen kliens használata esetén a sűrűbben küldött értékek elvesznek. Minden egyes lépés megtétele után. Erre azért van szükség, mert az általam használt ESP órajele mellett ez a legalkalmasabb sebesség arra, hogy ne árásszuk el és terheljük túl a rendszert.

3.5.

Könnyen belátható, hogy a szkennelés gyorsasága a lépésszám változtatásával érhető el, azaz, ha beépített tengelyeken más menetemelkedést használunk. Természetesen ez a paraméter a szkennelés felbontására is hatással lesz, ami - mivel egy mikroszkópról beszélünk - nem kívánt eredményekhez vezethet.

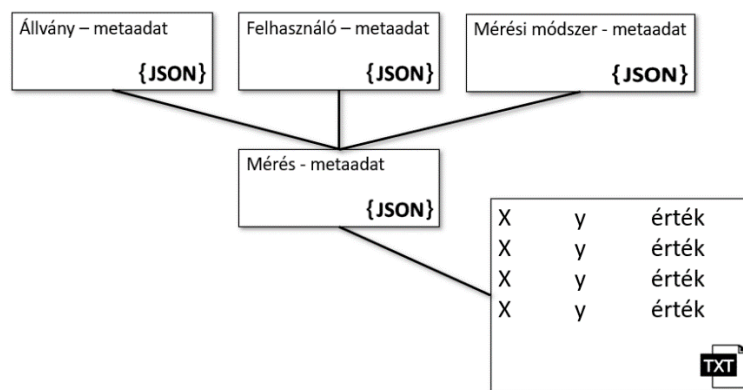
38

fényerősséget a legerősebb ponton. A legerősebb pont megállapításához pedig a szkennelés során első kép elkészítésénél futtatok egy kördetektálást, hogy megtaláljam a fénysugarat a készült képen. Az így kapott körön megkeresem a legfényesebb pontot és annak koordinátáit rögzítem. A rögzített ponton pedig egy-egy mérést végzek minden egyes ágymozgatás alkalmával, melyet elmentek. A kapott értéket, hogy viszonyíthassam, időről-időre egy-egy referenciaméréshez kötöm. Ennek az időköze szabadon befolyásolható, hogy hány kockánként történik meg. A referencia képen a fénysugár nem világít a tárgyra, így szabadon láthatja a kamera, ekkor szintén készít egy képet és egy kördetektálást rajta, melyből kiveszi szintén a legfényesebb pixel értékét és ezt eltárolja, valamint megjelöli.



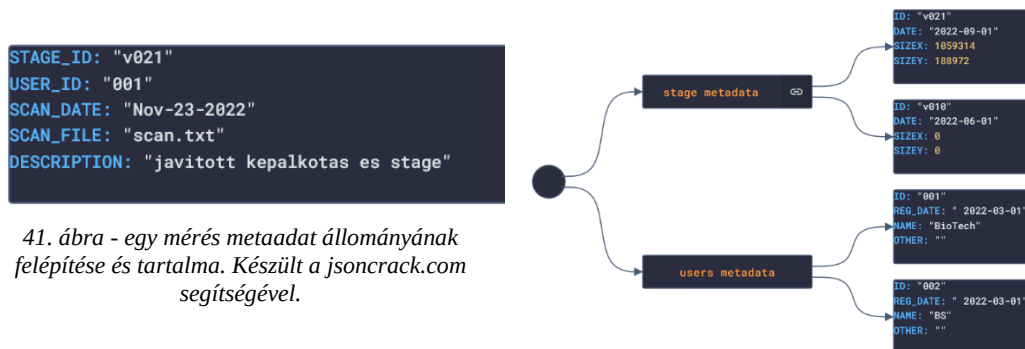
39. ábra - a mérés folyamata, készült a Draw.io segítségével

A mérési adatok metaadatait JSON formátumban tárolja el, melynek minimális felépítése az alábbi 52. ábrán látható.



40. ábra - a mérés felépítése

A mérési értékeket txt vagy csv formátumba is kiexportálhatjuk, ami névként kapcsolódik a metaadat fájlhoz, ami a szerveren tárolt metaadat állományokban szereplő adatokból kerülhet feltöltésre. Amennyiben nem létező felhasználót vagy állványt adunk meg úgy a mérés hibát észlel és nem indul el.



41. ábra - egy mérés metaadat állományának felépítése és tartalma. Készült a jsoncrack.com segítségével.

42. ábra - szerver oldali metaadatállományok felépítésére példa. Készült a jsoncrack.com segítségével.

Ugyanakkor a mérési eredményeket pedig egy nyers szöveges állományban rögzíti, melyben minden sor új mérésként jelenik meg, ennek felépítésére példa:

```

1. 0 0 81.40712069901075
2. 0 1 90.98586060480505
3. 0 2 92.29564031134889
4. 0 3 88.82537835552577
  
```

Ahol az első érték “x”, a második “y”, a harmadik pedig az eljárással készült mérési eredményt jelöli.

A mérés módszertana szabadon választható, egyszerre több is választható, ahogy az a fenti ábrán is látható, ugyanakkor az a mérés gyorsaságát nagyban befolyásolja, értelemszerűen.

Az általam kipróbált mérési módok

A fényesség megállapításához lumineszcencia mérést végzünk. Ez ebben az esetben kicsit eltér a fényerő szokásos jelentésétől. A fényerő általánosságban adott egységalapterületen mért fénymennyiséget jelent, mely a fényforrástól a cél irányába áramlik/esik, adott szögben [100]. Ez általában a fény hullámhosszának súlyozásától is függő érték [101]. A méréshez használhatjuk a (14) képletet [102], mely egy bevett módszer a fény intenzitás mérésre.

$$\frac{\sum_1^{\text{vizsgált pixelek száma}} (0.299 \cdot R + 0.587 \cdot G + 0.114 \cdot B)}{\text{vizsgált pixelek száma}} \quad (13)$$

Vagy a (15)(16) -os egyenletekben [103] található módszereket.

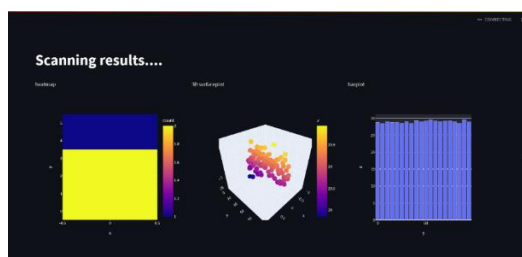
$$\frac{\sum_1^{\text{vizsgált pixelek száma}} (0.299 \cdot R + 0.587 \cdot G + 0.114 \cdot B) - (0.299 \cdot R_{\text{base}} + 0.587 \cdot G_{\text{base}} + 0.114 \cdot B_{\text{base}})}{\text{vizsgált pixelek száma}} \quad (14)$$

De mivel ezek jelentősen lassabbak és ezen körülmények között nem tapasztaltam jelentős változást, ezért maradtam a gyorsabb (14) -es megoldásnál a tesztelés során, illetve alapértelmezettként.

$$\frac{\sum_1^{\text{vizsgált pixelek száma}} \sqrt{0.299 \cdot R^2 + 0.587 \cdot G^2 + 0.114 \cdot B^2}}{\text{vizsgált pixelek száma}} \quad (15)$$

3.6 Adatvizualizáció 2D-3D

A fentiekből kiindulva az adatok vizualizáláshoz egy kliens Python alkalmazást készítettem Streamlit, Plotly, könyvtárak segítségével, melyen valós időben jelennek meg a mérési adatok mind hő térkép, mind 3D plot formájában. Értelemszerűen ugyanezen eszköz képes mind az A-szken mind a B-szken prezentálására.



43. ábra - A-szken megjelenítése a fejlesztett kliensprogram segítségével - saját kép

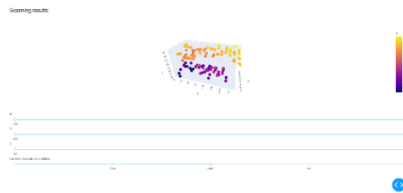
A 3D pontfelhő vizualizálásra és a mérési adatok kezelésére készítettem még két másik megoldást is. Az egyik kifejezetten 3D pontfelhők vizualizálására szolgáló pyntcloud^{xiii} segédkönyvtár segítségével készült, amivel később szintén 3D

^{xiii} <https://github.com/daavoo/pyntcloud>

modellként lehet kezelni az eredményeket, a másik pedig a plotly és Dash^{xiv} segítségével készült, amibe beépítettem olyan funkciókat melyekkel szűrhetünk a különböző tengelyek mentén a mért értékekre, valamint kerekíthetjük a mérési eredményeket fel vagy le.



44. ábra - pyntcloud használatával vizualizálva egy fél alátét B-szkenje, saját kép

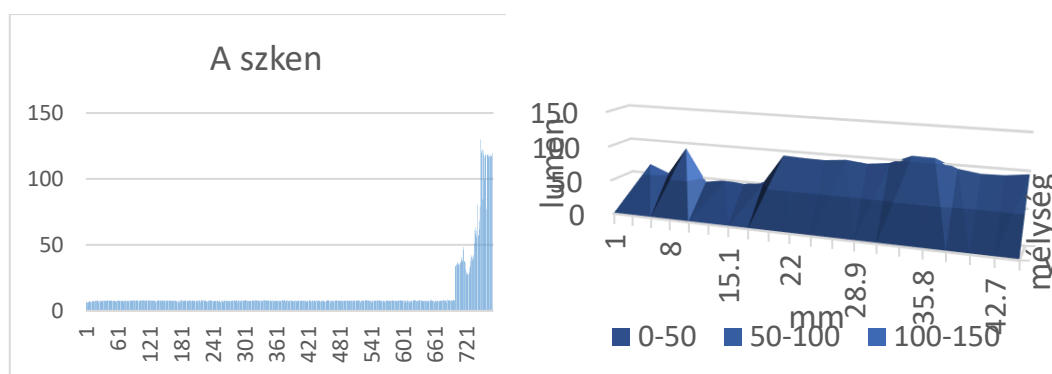


45. ábra - plotly - Dash használatával vizualizálva egy fél alátét B-szkenje - saját kép



46. ábra - a félig szkennelt alátét

A mérési adatokat egy Samba szerveren tárolja el az rPi, így onnan lekérhető bármilyen eszközzel, így akár saját scriptek segítségével is készíthetünk ábrákat, szűrhetjük, utófeldolgozhatjuk az adatokat, vagy - mivel egy nyers fájlban, vagy beállításra csv állományban is tárolódnak az eredmények - akár még Microsoft Excelben is utófeldolgozhatjuk, amire alább egy példa.



47. ábra - Egy a mikroszkóp által végzett A-szken Microsoft Excelben feldolgozva

Az adatok lekéréséhez az elkészült Python könyvtár alkalmas, az API -szerű használatra is, a létrehozott függvények mind a szkennelési beállításokat, mind a szkennelési eredményeket képes lekezelni. Erre példa az alábbi képek, melyek lekérdezés segítségével készültek.

^{xiv} <https://dash.plotly.com/>

5 Tesztelés

5.1 Hardware tesztelés

A hardware elemek teszteléséhez először forrasztás nélküli próbapanelen építettem meg az áramköröket, ott is teszteltem le, majd külön ugyanezt elvégeztem hagyományos próbapanelen is forrasztással a stabilitás érdekében. Az első közös funkcionális tesztek a forrasztás nélküli panelen végeztem el. Természetesen mindent ugyanúgy meg kellett ismételni a forrasztott panelen is.

5.1.1 Az optika tesztelése

Az optikai rendszer felépítéséhez a rendelkezésre álló gyűjtőlencsét használtam, melyek fókusztávolságát [104] (jelöljük F) nem ismertem, így előbb azokat ki kellett tesztelnem, megközelítőleg.

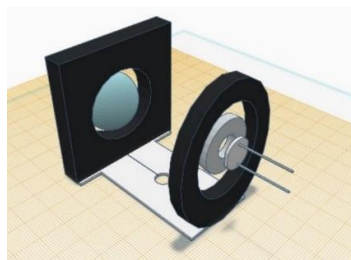


50. ábra - a házi fókusztávolság mérő tákolmányom

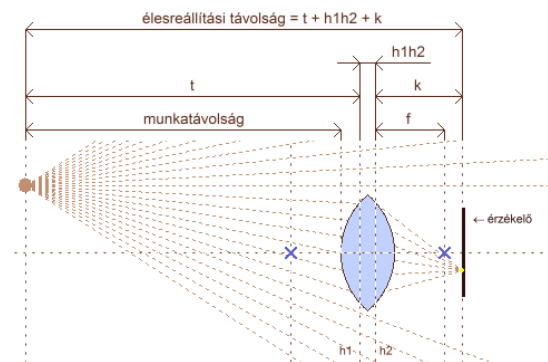


51. ábra - a rendelkezésre álló lencsék egy része becslést követően

Ehhez egy rögtönzött módszert használtam, mellyel egy nagyságrendi értéket szerettem volna megállapítani a fókusztávolságokra, hiszen a pontos értékeket az asztalon található lyukak távolsága miatt úgysem lehetne pontosan beállítani.



52. ábra - a pinhole (szűrén)-második lencse (világoskék) közti távolságot rögzítő elem (fehéren) és annak sematikus működési modellje – készült Autodesk Tinkercad segítségével



53. ábra - tárgytávolság - fókusztávolság – képtávolság, készítette Nagy Krisztián [105]

Egyetlen egy érték van, amit fontosnak tartottam pontosan beállítani, ez pedig a második gyűjtőlencse pozíciója, hogy az abba bejutó fény a megfelelő távolságból induljon, azaz a tárgytávolsága [106] (*jelöljük t*) a félig áteresztő prizmából, illetve a fókusz-távolsága pont a pinhole-ra, míg a képtávolsága [107] a pinhole-on túlra, a szenzorra essen. Ehhez a szenzort a pinhole tartó elemre rögzítettem. A pinhole-második lencse távolságot pedig egy szintén saját, erre a célra készített elem segítségével fixáltam, majd az egészet egy mozgatható optikai sínre szereltem fel, így a beam-splitterből érkező fény tárgytávolsága állítható, tehát lehetséges a fókuszálás a rendszerben, míg a fókuszpontja továbbra is állandó, így nem szükséges külön állítani a kettőt, de manuálisan mégis képesek vagyunk fókuszálni.

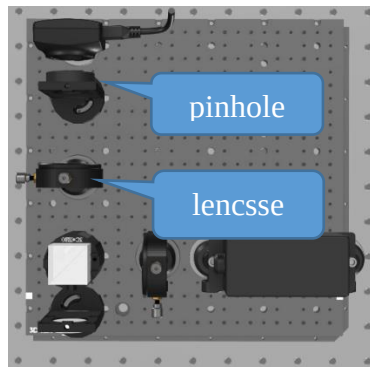
Ennek megfelelően válogattam ki a rendelkezésre álló lencsék közül azt, amelyik megfelel, a t és F értékük közel kerekíthető egy-egy lyuktávolsághoz az optikai asztalon.

Az optikai asztal lyuktávolsága 20mm lyuk origótól-origóig, a lyukak legszélső szélétől-széléig viszont 30mm, de a végső összeszerelés egy 3D nyomtatott asztal részleten történik, melynek pontossága várhatóan nem közelíti meg a hivatalos optikai asztal paramétereit, így vettem a bátorságot és 3-mal osztható kerekített értékeket használtam a tervezés során.

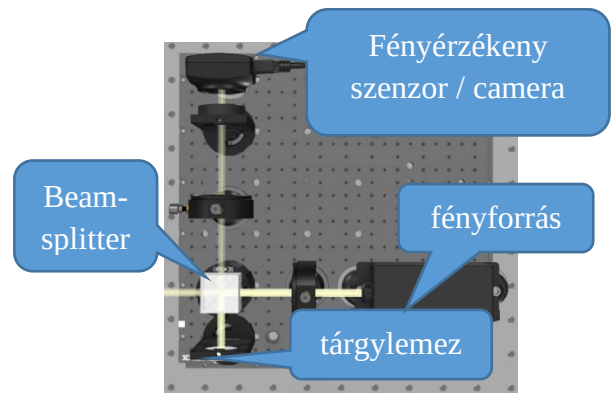
Felhasznált lencsék	Fontosabb megközelítő értékeik
I. lencse	$t \approx 60\text{mm}$
	$F \approx 25\text{mm}$
II. lencse	$t \approx 90\text{mm}$
	$F \approx 4,5\text{mm}$

9. táblázat - felhasznált lencsék fontosabb értékei a korábban bevezett jelölésrendszer szerint

Az optika elméleti teszteléséhez a 3D Optix webappot használtam, amivel modellezhetőek és tesztelhetőek komplex optikai rendszerek is és használata nem kíván nagy előjártasságot, de mégis számos fontos beállítás könnyen elérhető.

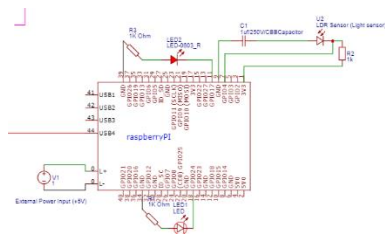


54. ábra - az optikai rendszer terve 3DOptiX-ban

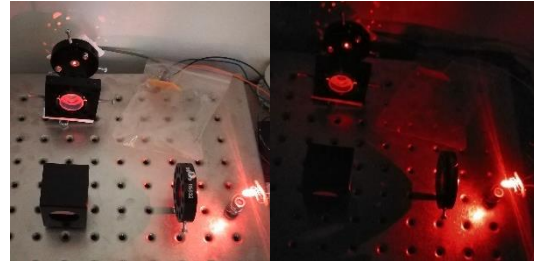


55. ábra - az optikai rendszer tesztje 3DOptiXban

Ezután leteszteltem optikai asztalon a valóságban is, amihez egy segéd-ledet is bekapcsoltam, ellenőrizendő, hogy mérés történik anélkül, hogy képernyőre lenne szükség az rPI-hez, ami nyilvánvalóan befolyásolná a sötét szobában mérhető fény mennyiségét.



56. ábra - a tesztelés idejére módosított áramkör

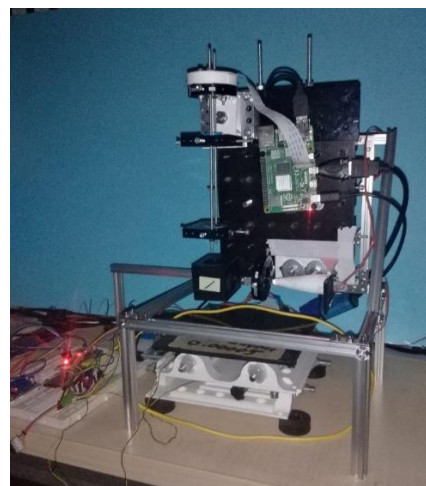


57. ábra - próba az optikai asztalon

Ezt követően a végleges, 3D nyomtatott optikai állványon következett a teszt ugyanezekkel az elemekkel.



58. ábra - a végleges optika működés közben



59. ábra - kép a végleges optikáról

A fókusz beállítása a korábban mutatott eszköz segítségével történt meg. Ezen eljárás során azt kerestem, melyik magasságban a lehető legnagyobb a fény intenzitása, azaz a lencse hol éri el a fókuszpontot az adott magasságról visszaverődő fény esetében. Ezzel egy alapértéket szerettem volna beállítani, melyhez később az értékeket viszonyíthatom.



60. ábra - fókuszkereső rendszer beállítása - 50000 lépés körülbelül 1 mm – léptetés előtt



61. ábra - fókuszkereső rendszer beállítása - 50000 lépés körülbelül 1 mm – léptetés után

A „fókuszkeresés” közben azonban egy a tápfeszültségből érkező sinusoid zajt észleltem, melyet, mivel elérhető viszonyítási alapom nem volt, így sem pozitív sem negatív zajként nem tudtam értelmezni.



62. ábra - zaj a mért intenzitáson

Ugyanakkor további fejlesztési lehetőségként megemlíteném, hogy a tápnál elegendő kondenzátor beiktatásával valószínűleg kiiktatható a probléma.

A mérés lépésközét kalibrált milliméterpapír segítségével tudtam megállapítani mind az állvány esetén, mind a fókuszkereső esetén. A kapott értékek alapján 31250 kis lépésnek feleltethető meg 1mm az állvány kapcsán, és körülbelül 50000-nek a fókuszkereső esetén. Ez jól jelzi, hogy még számos lehetőség van az eszköz pontosságát növelni, csupán ez az az érték, amit a rendelkezésemre álló eszközök segítségével ki tudtam mérni.



63. ábra - az állvány kalibrálás közben - saját kép

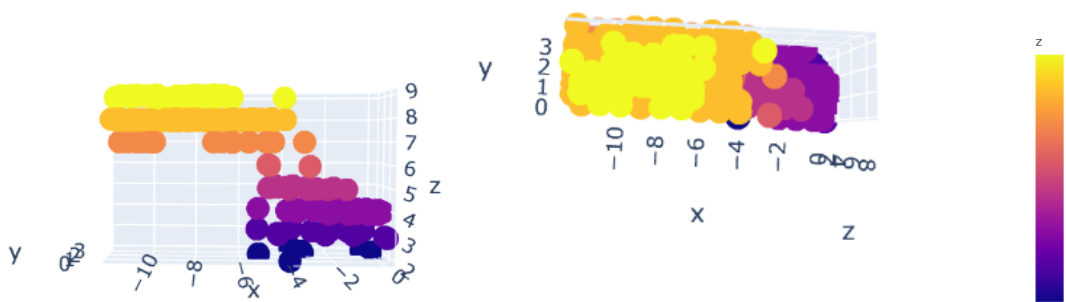
```

stepper: -325000 -> -450000
stepperX current Position: -450000
!_ settings:
!_ settings: logOnOff = true
!_ settings: Current settings:
!_ settings: step: 31250
!_ settings: step: 31250
!_ settings: current position X: -450000
!_ settings: current position Y: 0
!_ settings: current direction:
!_ settings: limitSwitch_XE (LOW - switch ON / HIGH - switch OFF): 1
!_ settings: limitSwitch_XY (LOW - switch ON / HIGH - switch OFF): 0
!_ settings: limitSwitch_YE (LOW - switch ON / HIGH - switch OFF): 0
!_ settings: limitSwitch_YV (LOW - switch ON / HIGH - switch OFF): 0
!_ settings: wait
!_ settings: wait
!_ settings:
stepper: -450000 -> -481250
stepperX current Position: -481250
!_ settings:
!_ settings: logOnOff = true
!_ settings: Current settings:
!_ settings: step: 312500
!_ settings: step: 312500
!_ settings: current position X: -481250
!_ settings: current position Y: 0
!_ settings: current direction:
!_ settings: limitSwitch_XE (LOW - switch ON / HIGH - switch OFF): 1
!_ settings: limitSwitch_XY (LOW - switch ON / HIGH - switch OFF): 0
!_ settings: limitSwitch_YE (LOW - switch ON / HIGH - switch OFF): 0
!_ settings: limitSwitch_YV (LOW - switch ON / HIGH - switch OFF): 0
!_ settings: wait
!_ settings: wait
!_ settings:
stepper: -481250 -> -793750
stepperX current Position: -793750
!_ settings:
!_ settings:
stepper: -793750 -> -481250
stepperX current Position: -481250

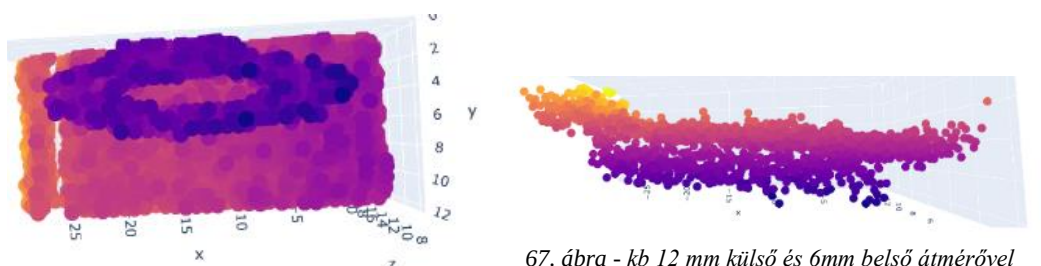
```

64. ábra - a használt beállítások és a lépés eredményei a konzolos kimeneten

Mérési eredményként egy 2mm/lépés felbontású képen mutatnám meg egy 10ft-os érmén a címert mályvaszínnel a pontfelhőben: illetve egy kis alátét szkenjét alább.



65. ábra - 10ft-os érme B szkenje, ahol a magas értékeket az állvány adja, a mélyeket az érme. A mérés lépésköze: 2mm



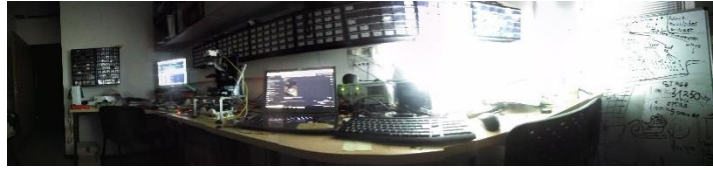
66. ábra - kb 12 mm külső és 6mm belső átmérővel rendelkező alátét mérési eredménye alulnézetből

67. ábra - kb 12 mm külső és 6mm belső átmérővel rendelkező alátét mérési eredménye oldalnézetből

Érdekességgépp megemlíteném, hogy a mérés nem teljesen sötét környezetben készült, hanem konstans fény mellett, ahogy alább látható.

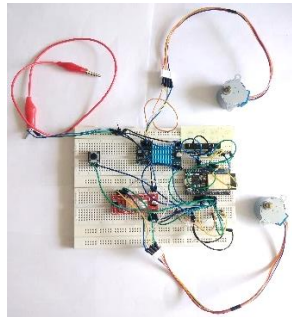


68. ábra - kb 12 mm
külső és 6mm belső
átmérővel rendelkező
alátét mérés közben

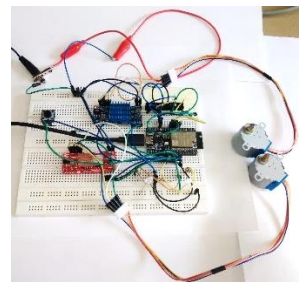


69. ábra - a mérés körülményei

5.1.2 motorvezérlés beágyazott rendszere

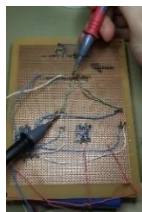


70. ábra - motorvezérlés - hardware teszt

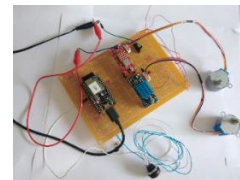


71. ábra - motorvezérlés - funkcionális teszt

A motor vezérlésének kódrészletét egységteszteltem saját teszt scriptek alkalmazásával. Ezek után a motorvezérlés áramkörét a forrasztott próbapanelen teszteltem le. Előbb az áramkör zárlatosságát, majd az áramkör működését, ahogy azt korábban a forrasztás nélküli próbapanelen is elvégeztem, amint az a fenti, valamint alábbi ábrákon látható.



72. ábra - a forrasztott panel elektronikai teszt
közben, amikor esetleges zárlatokat mértem ki



73. ábra - forrasztott próbapanel funkcionális teszt
során, az üres pinek a végállás kapcsolók
csatlakozási pontjai melyeket ez alkalommal nem
teszteltem

4. Felhasználási lehetőségek – felhasználói dokumentáció

6.1 Az állvány felhasználási lehetőségei

Az állvány a precizitása miatt és mivel nem szükséges hozzá feltétlen az rPI által nyújtott vezérlés, akár egy személyi számítógépről vagy laptopról is kezelhető, így bármilyen kis mozgásokból álló kisméretű de pontos mozgatáshoz megfelel, mint asztal. Ilyen lehet a makró filmezés, de akár más típusú mikroszkópok potenciális állványául is szolgálhat, mint például egy lézeres dissector [108].

Az állvány használatát kétféleképpen tehetjük meg, mint arra korábban már utaltam. Az egyik az, ha pontosan szeretnénk egy-egy lépést tenni, a másik amikor egyszerre több apróbb lépésből szeretnénk egy-egy nagyobb lépést megtenni.

Első rákapcsolódáskor egy segítő menüt ad a konzolra az állvány, ezen az alap parancsok jelennek meg, ahogy alább látható.

```
Give a direction to move:
w      forward on X axis
s      backward on X axis
a      forward on Y axis
d      backward on Y axis
Give a direction to move with AccelStepper:
fx     forward on X axis
tx     backward on X axis
fy     forward on Y axis
ty     backward on Y axis
Get help: 'help'
```

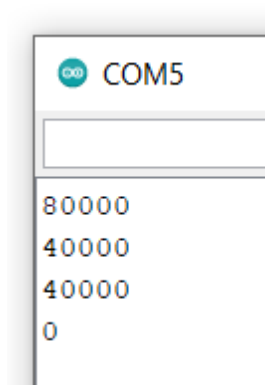
74. ábra - kezdeti üdvözlőüzenet az állvány kapcsolódásakor. Saját kép.

A vezérlést - ahogy az fentebb is látható - vagy kis lépésekkel tehetjük meg, vagy nagyobb lépésközökkel, ezek parancsai alább táblázatba gyűjtve láthatóak:

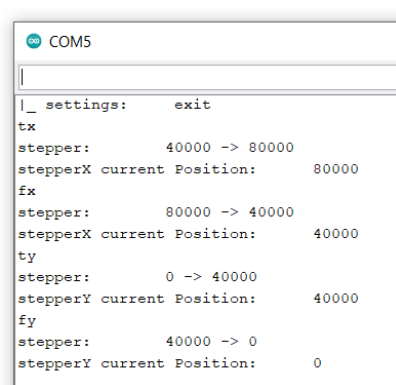
Irány	Parancs – kis lépésekre	Parancs lépésköz használatával
X tengely előre	W	Tx
X tengely hátra	S	Fx
Y tengely előre	D	Ty
Y tengely hátra	A	Fy

75. ábra - vezérlési parancsok

Ezek után párhuzamosan láthatunk egymás mellett egy teljes naplózási vezérlést és a közvetlen vezérlést, ha kiindulási eset az 'X' tengelyen 40000, az 'Y' tengelyen 0, a lépésköz 40000.

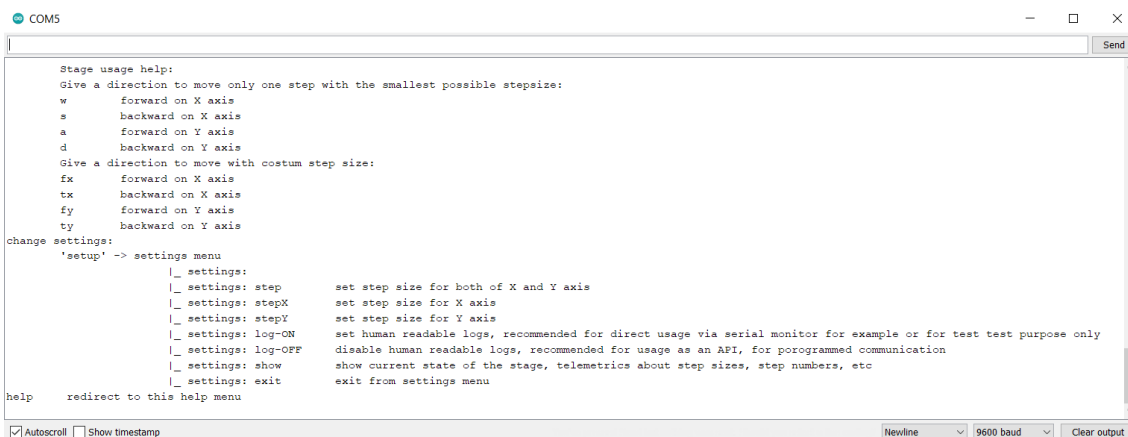


76. ábra - A 'txfxyfy' parancsok eredménye naplózás nélkül. Saját kép.



77. ábra - A 'txfxyfy' parancsokra kapott prancssori válaszok naplózás mellett. Saját kép.

Az elérhető parancsok, funkciók a 'help' parancs után jelennek meg, erre példa alább.

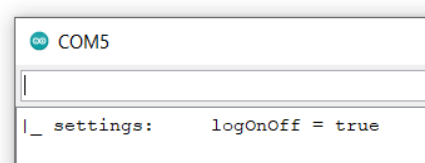


78. ábra - 'help' parancs kimenete

A naplózást, ahogy azt a fenti képen is láthatjuk, a beállítások menüben tudjuk bekapcsolni. Alapértelmezetten nincs bekapcsolva, erre példa látható alább.

1. setup
2. log-ON

1. kódrészlet



79. ábra – „setup\nlog-ON” kódrészlet kimenete

4 Továbbfejlesztési lehetőségek

4.1 Állvány

Értelemszerűen, ahogy azt már eddig is kiemeltem, a mikroszkóp pontossága a használt tengelyek menetszámától függ. Azaz kisebb menetszám esetén részletesebb méréseket készíthetünk.

Az állványon megfigyeléseim szerint tetszőleges méretű asztalt alakíthatunk ki, ennek mozgatása csupán az állvány súlyától és a használt motorok nyomatékától függ, ugyanakkor ez által tudjuk növelni a szkennelhető tárgyak méretét. Egyszerű ámde hatásos trükk lehet a végállás kapcsolókat kitolni messzebbre és a tengelyek ágyhoz kötött tartóelemeit hosszában megrövidíteni, ugyanakkor a stabilitás növelés érdekében számukat megtöbbszörözni.

Vizualizáció

A pontosabb mérésekhez használható volna más képlet is, amely ugyan lassabb, de az irodalom [109] alapján pontosabb eredményt ad. A mérések pontossága továbbá függ a használt fényforrástól. Az automata szkennelés során további problémát okozhat a használt számítási egység, jelen esetben rPI órajele, mivel a mérés adott ideig készül, amire való várakozás az órajel növelésével gyorsítható. A mérési eredményekből alkotható 2D hőterkép, ha képként gondolunk, akkor Super Resolution eljárással finomíthatjuk. Akár képként is értelmezhetjük, akkor használhatunk meglévő eljárásokat, könyvtárakat [110]. A folyamat azonban gyorsítható, ha videófelvételt rögzítünk és nem képenként készülnek a képek. Ekkor, ha a tengelyléptetés sebességével megegyező a képsűrűsége a videófelvételnek, úgy a képkészítés is felgyorsul, a számítás egy párhuzamos szálon végezhető szabadon.

Optika

Az optika hozzáadott mozgatható pontokkal tovább fókuszálható, a tárgy méretéhez igazítható, illetve a fókuszkereső eszköz tengelye megnövelhető.

Beágyazott rendszer

Az állványhoz érintőképernyőt adhatunk, ezáltal az egész sokkal felhasználóbarátabb lesz. Az ágy méretein változtatva hosszabb tengelyek építhetők be, ezáltal nagyobb kiterjedésű minták olvashatóak be. A fényintenzitás méréseire használt szenzor minősége más modellre való váltással javítható.

A mérésben megjelenő szinuszoid zajra megoldásként több kondenzátor bekötését javasolnám a feszültségforrás és a fényforrás közé.

5 Összefoglalás

Összességében elmondhatjuk, hogy továbbfejlesztések nélkül is egy - a felhasznált anyagokhoz és azok minőségéhez képest - az elvártaknál jobb eszköz alkotható a fenti módszerek és technológiák használatával. Ez a piacon megtalálható többi pásztázó lézerszkennert mikroszkóphoz képest ár-érték arányban teljes bizonyossággal állíthatom, hogy felveszi a versenyt, hiszen jelen esetben \$274 579 (2004) költségű [111] eszközökről van szó melyeknek még bérleti díja is magas [112], ehhez képest pedig könnyen belátható, hogy ezen eszköz a töredékébe kerül. Még ha ugyan pontosságban természetesen elmarad a fent említett eszközöktől, ahogy azt említettem, számos fejlesztési lehetőség áll rendelkezésre, mellyel könnyen tovább javítható szinte minden fontos paramétere.

A fentiekben bemutattam, azt, hogy megterveztem egy pásztázó lézer szkennert mikroszkóp vezérlő áramkörét, vezérlő programját és vizualizációs szoftvert, valamint pár elem esetén a szükséges 3D modelleket is.

Létrehoztam ezáltal egy kész működő eszközt mely tovább fejleszthető akár, de jelenlegi formájában is használható teljes értékű lézer szkennerként modellek alkotására felületekről.

Köszönetnyilvánítás

Szeretném megköszönni ezen munka elvégzéséhez kapott rengeteg támogatást, inspirációt, útmutatást és végül, de nem utolsósorban a lehetőséget témavezetőmnek, a fejlesztéshez szükséges erőforrásokat az EKIK-nek és a Biotech labornak.

Külön megköszönném itt kollégáim és édesanyám támogatását, Kucarov Marianna Dimitrova szakértelmét, Garamvölgyi Tivadar, Virág Dominik, Vincze Miklós és Abdallah Benhamida, Biricz Bence ötleteit, valamint Reicher Viktória szellemi támogatását.

Rövidítésjegyzék

rPI	Raspberry PI2 model B rev 1.1 [113]
rPICAM	Raspberry PI CSI kamera v2.2
eoxxxxxx	Edmund Optics „xxxxx” sorszámú eszköz
ESP32	ESP32 WROVER-B [114]
motor	28BYJ-48 léptető motor 5V DC [115]
motorvezérlő	easydriver v4.4 [116]
heatmap, hőterkép	Adatkeret színkódolt mátrix ábrázolása [117]
2D	2 dimenziós ábrázolás, hagyományos Descartesi módszerekkel
3D	3 dimenziós ábrázolás, hagyományos Descartesi módszerekkel
X tengely	Az X tengelye az ágynak [118], azaz azon oldala ami a felhasználó felé esik
Y tengely	A Y tengelye az ágynak [119], azaz azon oldala, mely merőleges az X tengelyre
Sor	Az x tengely mentén végálláskapcsoló jelzéstől végálláskapcsoló jelzésig tartó szakasz az ágymozgatás során
Oszlop	Az y tengely mentén végálláskapcsoló jelzéstől végálláskapcsoló jelzésig tartó szakasz az ágymozgatás során
Sor/oszlop eleje-vége	A sorok/oszlopok eleje értelemszerűen az X tengely esetén a legbaloldalibb elérhető pont az állványvezérlés által. Az Y tengely mentén az X tengelyhez legközelebbi elérhető pontja az állványnak. A vége az értelemszerű ellentétes pontja.
O, Ω , Θ jelölések	Az algoritmusok költségfüggvényei maximális, minimális és szigorú korlátok között, az Ásványi féle jelölésrendszer szerint ¹²⁰ .

Irodalomjegyzék

-
- [1] Edinburgh Imaging, „What Is Microscopy?”, The University of Edinburgh, 2018. szeptember 27., <https://www.ed.ac.uk/clinical-sciences/edinburgh-imaging/for-patients-study-participants/tell-me-more-about-my-szken/what-is-microscopy>.
- [2] Savile Bradbury, „Electron Microscope | Instrument | Britannica”, 2021. december 22., <https://www.britannica.com/technology/electron-microscope>.
- [3] Bozó Balázs, „Fotokatódos elektroncsövek: fotocellák, foto-elektronsokszorozók, képfelvévőcsövek - kameracsövek.”, 2005. 2021, <http://www.elektroncso.hu/cikkek/fotocso.php>.
- [4] Bozó Balázs.
- [5] Rapp Instruments, „Experimente mit Vidikons”, elérés 2022. február 26., <https://www.rapp-instruments.de/NewsPage/Vidikon/vidikon.htm>.
- [6] Csikósné Dr. Pap Andrea Edit, „Anyagismeret laboratórium BSc”, 2016, <https://uni-obuda.hu/users/pap.andrea/anyagbsc.html>.
- [7] Csikósné Dr. Pap Andrea Edit.
- [8] József Cserti, *Bevezetés a modern optikába - II. BSc fizikus hallgatóknak* (ELTE, 2007), http://cserti.web.elte.hu/okt/MO-09_CsJ.pdf.
- [9] György Dr. Ábrahám és mtsai., *Műszaki Optika*, 7 köt. (Budapest: BME MOGI, 2014), https://mogi.bme.hu/TAMOP/muszaki_optika/math-index.html.
- [10] David R. Caprette, „Dark Field Microscopy”, 2010. augusztus 12., <https://www.ruf.rice.edu/~bioslabs/methods/microscopy/dfield.html>.
- [11] Prof.Dr. Ábrahám György, „Az infravörös tartományú optikai rendszerek optikai átviteli függvényeinek rendszerteknikai származtatása”, 2014, <http://www.pannonpalatinus.hu/wp-content/uploads/2014/09/Infra-optikai-rendszerek2.pdf>.
- [12] Bereznai Miklós, „Optikai mikroszkópia”, elérés 2022. április 8., https://www.enfo.hu/sites/default/files/SVM.Opt_Mikroszkopia.pdf.
- [13] R. Fabian W. Pease, Manu Prakash, és James Stanley Cybulski, „United States Patent Application Publication Pub. No.: US 2017/0062179 A1 - VACUUMITUBE ELECTRON MICROSCOPE”, 2017. március 2., <https://patentimages.storage.googleapis.com/cf/5d/86/d144614ec0d749/US20170062179A1.pdf>.
- [14] R. Fabian W. Pease, Manu Prakash, és James Stanley Cybulski, Vacuum tube electron microscope, United States US20170062179A1, filed 2016. július 29., és issued 2017. március 2., <https://patents.google.com/patent/US20170062179/en>.
- [15] Casimir Kuzyk, „AweSEM: Increasing Access to High-Resolution Imaging with a Low-Cost Skenning Electron Microscope”, 2019. június 26., <https://contest.techbriefs.com/2019/entries/manufacturing-robotics-automation/9757>.
- [16] Venkes, „Laser Skenning Microscope”, Instructables, 2017, <https://www.instructables.com/Laser-Skenning-Microscope/>.
- [17] Jeremy Cook, „DIY Laser Skenning Microscope”, Hackster.io, 2021, <https://www.hackster.io/news/diy-laser-skenning-microscope-ccf2294a0c49>.
- [18] Urs Gaudenz, „GaudiLabs/OpenLaserSkenningMicroscope”, Processing, 2022. február 12., <https://github.com/GaudiLabs/OpenLaserSkenningMicroscope>.
- [19] AlHasan Muhammad Ali, „Make Your Own Laser Skenning Microscope”, Electronics-Lab.com, 2017. február 15., <https://www.electronics-lab.com/make-laser-skenning-microscope/>.
- [20] *Confocal Laser Skenning Microscope Leica TCS SP8*, 2012, <https://www.youtube.com/watch?v=2PbM3QcU8tU>.
- [21] Josh Campbell, „Laser XY Skenner”, Arduino, 2022. január 21., <https://github.com/ThingEngineer/Laser-XY-Skenner>.
- [22] *I made a skenning laser microscope*, 2021, <https://www.youtube.com/watch?v=9TYlQ4urcg8>.
- [23] edmundoptics, „What Are Beamsplitters?”, elérés 2022. április 22., <https://www.edmundoptics.eu/knowledge-center/application-notes/optics/what-are-beamsplitters/>.
- [24] Cserti, *Bevezetés a modern optikába - II. BSc fizikus hallgatóknak*.

- [25] M. Young, „Pinhole Optics”, *Applied Optics* 10, sz. 12 (1971. december 1.): 2763–67, <https://doi.org/10.1364/AO.10.002763>.
- [26] Carolyn Mathas, „Light Sensors: An Overview”, Digi-Key Electronics, 2012. szeptember 11., <https://www.digikey.com/en/articles/light-sensors-an-overview>.
- [27] Miklós Mészáros, *Félvezető eszközök, áramköri elemek I.* (Budapest: Nemzeti Szakképzési és Felnőttképzési Intézet, é. n.), https://www.nive.hu/Downloads/Szakkepzesi_dokumentumok/Bemeneti_kompetenciak_meresi_er_tekelesi_eszkozrendszerenek_kialakitasa/6_0917_011_101115.pdf.
- [28] *The Big Misconception About Electricity*, 2021, <https://www.youtube.com/watch?v=bHlhgxav9LY>.
- [29] Imre Hevesi és Iván Gyémánt, *Félvezető optika* (Szeged: Kimenet orientált képzésfejlesztés a Dél-alföldi Régió szolgáltató egyetemén), elérés 2022. május 10., https://titan.physx.u-szeged.hu/~dpiroska/felvez/flvezet_anyagok.html.
- [30] Young, „Pinhole Optics”.
- [31] Mészáros, *Félvezető eszközök, áramköri elemek I.*
- [32] Abhiram Gnanasambandam és mtsai., „Megapixel Photon-Counting Color Imaging Using Quanta Image Sensor”, *Optics Express* 27, sz. 12 (2019. június 10.): 17298–310, <https://doi.org/10.1364/OE.27.017298>.
- [33] Dr. Kovács Ernő, „Elektronikai előadás jegyzetek IV. OPTO-ELEKTRONIKAI ESZKÖZÖK, KIJELZŐK ÉS MEGJELENÍTŐK” (Miskolci Egyetem Elektrotechnikai-Elektronikai Tanszék, 2002), <https://atom.ubbcluj.ro/alpar/bibliografia/optoelektronika/magyar/dr.%20Kov%C3%A1cs%20E.%20-%20Elektronika%20IV%20-%20optoelektronika.pdf>.
- [34] Eric R. Fossum, „Active Pixel Sensors: Are CCDs Dinosaurs?” (S&T/SPIE’s Symposium on Electronic Imaging: Science and Technology, San Jose, CA, United States: Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 1993), <https://doi.org/10.1117/12.148585>.
- [35] Hamamatsu Photonics K.K., *PHOTON COUNTING Using Photomultiplier Tubes* (Japan: Hamamatsu, 1998), <https://wp.optics.arizona.edu/jpalmer/wp-content/uploads/sites/65/2018/11/pmtphotoncount.pdf>.
- [36] Inkyu Moon, Inbarasan Muniraj, és Bahram Javidi, „3D Visualization at Low Light Levels Using Multispectral Photon Counting Integral Imaging”, *Journal of Display Technology* 9, sz. 1 (2013. január 1.): 51–55, <https://doi.org/10.1109/JDT.2012.2227938>.
- [37] Faliu Yi, Inkyu Moon, és Yeon Lee, „A Multispectral Photon-Counting Double Random Phase Encoding Scheme for Image Authentication”, *Sensors* 14 (2014. május 20.): 8877–94, <https://doi.org/10.3390/s140508877>.
- [38] Gordon Holman és Sarah Benedict, „Solare Flare Theory Educational Web Pages - Hard X-Rays”, 1996. szeptember 23., <https://hesperia.gsfc.nasa.gov/sftheory/xray.htm>.
- [39] Hong Wei és mtsai., „Detailed Calibration of the PI-LCX:1300 High Performance Single Photon Counting Hard x-Ray CCD Camera” 26, sz. 2 (2017): 025204, <https://doi.org/10.1088/1674-1056/26/2/025204>.
- [40] Vishal Sawant, „At 8.65% CAGR, CMOS Image Sensor Market Size to Hit USD 23.04 Million in 2028, Says Brandessence Market Research”, 2022. március 17., <https://www.prnewswire.com/news-releases/at-8-65-cagr-cmos-image-sensor-market-size-to-hit-usd-23-04-million-in-2028--says-brandessence-market-research-301504963.html>.
- [41] imarc group, „Image Sensors Market Size, Share, Report & Forecast 2022-2027”, 2021, <https://www.imarcgroup.com/image-sensors-market>.
- [42] Peter Catrysse és Brian Wandell, „Roadmap for CMOS Image Sensors: Moore Meets Planck and Sommerfeld”, *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 2005. február 1., <https://doi.org/10.1117/12.592483>.
- [43] Catrysse és Wandell.
- [44] edmundoptics, „Imaging Electronics 101: Understanding Camera Sensors for Machine Vision Applications”, elérés 2022. július 21., <https://www.edmundoptics.com/knowledge-center/application-notes/imaging/understanding-camera-sensors-for-machine-vision-applications/>.

-
- [45] OmniVision Technologies, Inc., „5MP OV5647: Download Full Datasheet (Specs, Pinouts, Registers & Diagrams)” (OmniVision Technologies, 2009. március 11.), https://www.uctronics.com/download/Image_Sensor/OV5647_DS.pdf, <https://www.uctronics.com/5mp-ov5647-download-full-datasheet-pdf>.
- [46] Alasdair Allan, Andrew Scheller, és James Hughes, „Raspberry Pi Documentation - Camera”, 2022. március 8., <https://www.raspberrypi.com/documentation/accessories/camera.html>.
- [47] Alasdair Allan, Andrew Scheller, és James Hughes, „Raspberry Pi Documentation - Camera - Hardware Specification”, elérés 2022. augusztus 27., <https://www.raspberrypi.com/documentation/accessories/camera.html>.
- [48] Apertus, „AXIOM Beta Image Sensors | apertus° - open source cinema”, datasheet, 2022, <https://www.apertus.org/axiom-beta-imagesensors>.
- [49] Tomas Aidukas és mtsai., „Low-Cost, Sub-Micron Resolution, Wide-Field Computational Microscopy Using Opensource Hardware”, *Scientific Reports* 9, sz. 1 (2019. május 15.): 7457, <https://doi.org/10.1038/s41598-019-43845-9>.
- [50] Bryce E. Bayer, Color imaging array, United States US3971065A, filed 1975. március 5., és issued 1976. július 20., <https://patents.google.com/patent/US3971065A/en>.
- [51] Ray Fontaine, „Part 4: Non-Bayer CFA, Phase Detection Autofocus (PDAF) | TechInsights”, 2019. július 30., <https://www.techinsights.com/blog/part-4-non-bayer-cfa-phase-detection-autofocus-pdaf>.
- [52] Colin M.L. Burnett, „Bayer Filter”, in *Wikipedia*, 2022. augusztus 2., https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Bayer_filter&oldid=1101874134.
- [53] Sony Semiconductor Solutions Corporation, „Sony Group Portal - Sony Releases Stacked CMOS Image Sensor for Smartphones with Industry’s Highest 48 Effective Megapixels”, 2018. július 23., <https://www.sony.com/en/SonyInfo/News/Press/201807/18-060E/>.
- [54] news.samsung.com, „Samsung’s 108Mp ISOCELL Bright HM1 Delivers Brighter Ultra-High-Res Images with Industry-First Nonapixel Technology – Samsung Global Newsroom”, 2020. február 12., <https://news.samsung.com/global/samsungs-108mp-isocell-bright-hm1-delivers-brighter-ultra-high-res-images-with-industry-first-nonapixel-technology>.
- [55] Charles Harris és mtsai., „numpy.linalg.slogdet”, 2022. május 22., <https://numpy.org/doc/stable/reference/generated/numpy.linalg.slogdet.html>.
- [56] Univ. of Tennessee és mtsai., „LAPACK 3.10.1”, 2016, https://netlib.org/lapack/explore-html/dd/d9a/group__double_g_ecomputational_ga0019443faea08275ca60a734d0593e60.html.
- [57] Willem Van Onsem, „Answer to »Python : easy way to do geometric mean in python?«”, *Stack Overflow*, 2017. március 29., <https://stackoverflow.com/a/43099751/7973735>.
- [58] Dr. Joe Costa, „Calculating Geometric Means” (Buzzards Bay National Estuary Program), elérés 2022. augusztus 31., https://www.waterboards.ca.gov/water_issues/programs/swamp/docs/cwt/guidance/3413.pdf.
- [59] „Az áttétel kiszámítása | Faipari gépek és technológiák alapjai | Sulinet Tudásbázis”, elérés 2022. július 21., http://tudasbazis.sulinet.hu/hu/0d0cc85d-f7b5-41fb-aec0-d1b8362c7ebf_e90c4562-46d5-4b3a-a5ed-d640f67b512a_d41d5cfa-b57f-4504-8a56-98d9c893fbc_b3d25a7d-e75c-4396-84b1-61b188e6eea0_484b10f9-e3b4-4693-8f8e-9dd276833398_4ce66b2d-8bc4-4c6d-8ce0-3e1b9127b511_83e437b0-a0a1-4f1a-a4c5-0572b5cc02d2_40e1f5be-a6d6-4fbf-87fa-6787c4ffac05.
- [60] Adafruit Industries, „Small Reduction Stepper Motor - 5VDC 32-Step 1/16 Gearing”, elérés 2022. július 21., <https://www.adafruit.com/product/858>.
- [61] Edmund Optics, „0.125 Inch; Travel, X Axis, Micro Series with Covered Rails (A)”, elérés 2022. július 21., <https://www.edmundoptics.com/p/0125quot-travel-x-axis-micro-series-with-covered-rails/13280/>.
- [62] Paul Ahrens, „Thread Pitch Vs. Threads Per Inch (TPI)”, *Albany County Fasteners* (blog), 2018. július 23., <https://www.albanycountyfasteners.com/blog/thread-pitch-vs-threads-per-inch-tpi/>.
- [63] fred_dot_u, „Answer to »M# Screw mm per turn?«”, *Engineering Stack Exchange*, 2020. június 4., <https://engineering.stackexchange.com/a/36101>.

- [64] Vishnuvardhan Shakthibala és Rijk de Wet, „Gear Ratio RPM Calculator”, 2022. április 5., <https://www.omnicalculator.com/physics/gear-ratio-rpm>.
- [65] Németh Géza és Némethné Nádori Zénáb, „Fogaskerékpár számítása” (Miskolci egyetem gépészmérnöki és informatikai kar, é. n.), https://www.uni-miskolc.hu/gepelemek/tantargyaink/004bl_gepelemek2/gepelemek2-fa_segedlet3.pdf.
- [66] Vitányi Iván, „Modellezés - Fogaskerék áttételek tervezése”, elérés 2022. szeptember 2., http://vitanyi-ivan.hu/reszek/modell/attetel_.html.
- [67] Békefi és mtsai., „Technika és életvitel 7. - NT-00748”, elérés 2022. szeptember 2., https://www.geniusz.hu/bekefi-erlich-karsai-nedobane-technika_es_letvitel_7-nt-00748.
- [68] „Áthajtóművek különböző viszonyai | Gépelemek | Sulinet Tudásbázis”, elérés 2022. szeptember 2., http://tudasbazis.sulinet.hu/hu/0d0cc85d-f7b5-41fb-aec0-d1b8362c7ebf_e90c4562-46d5-4b3a-a5ed-d640f67b512a_1632497a-4975-4feb-ba4d-1dd363000ff7_50abf3fe-747f-40a3-99fd-d7a2b4e1b0fc_72c1a4b9-e347-4a79-92d2-1bf75221f03b_94bf3c6d-53f3-4a37-a010-061d215b8826_1b6fb256-2472-46c4-b36b-e49518511bfa.
- [69] smlease.com admin, „Gear Train : Gear Ratio, Torque and Speed Calculations”, *SMLease Design* (blog), 2018. november 18., <https://www.smlease.com/entries/mechanism/gear-train-gear-ratio-torque-and-speed-calculation/>.
- [70] Németh Géza és Némethné Nádori Zénáb, „Fogaskerékpár számítása”.
- [71] Abel Vincze, „Involute spur gear generator and simulator”, elérés 2022. szeptember 2., <https://geargenerator.com/#400,400,100,6,1,1,13872.30000000289,2,1,22,5.5,4,27,180,0,0,0,0,0,114,28.5,4,27,-60,0,0,0,0,0,0,3,708>.
- [72] Gus, „How to Setup a Raspberry Pi Light Sensor”, Pi My Life Up, 2016. január 30., <https://pimylifeup.com/raspberry-pi-light-sensor/>.
- [73] The Pi Hut, „Turning on an LED with Your Raspberry Pi’s GPIO Pins”, The Pi Hut, 2015. június 11., <https://thepihut.com/blogs/raspberry-pi-tutorials/27968772-turning-on-an-led-with-your-raspberry-pis-gpio-pins>.
- [74] F. Claudi és mtsai., „Brainrender : A Python-Based Software for Visualizing Anatomically Registered Data”, preprint (Neuroscience, 2020. február 25.), <https://doi.org/10.1101/2020.02.23.961748>.
- [75] Gaudenz, „GaudiLabs/OpenLaserSzkennigMicroscope”.
- [76] Campbell, „Laser XY Szkenner”.
- [77] Michael Waskom, „Seaborn.Heatmap — Seaborn 0.11.2 Documentation”, 2012. 2021, <https://seaborn.pydata.org/generated/seaborn.heatmap.html>.
- [78] Suraj Joshi, „Plot a 2D Heatmap With Matplotlib”, Delft Stack, 2020. április 28., <https://www.delftstack.com/howto/matplotlib/how-to-plot-a-2d-heatmap-with-matplotlib/>.
- [79] „3D Plot Pandas DataFrame”, linuxtut.com, 2021. január 21., <https://linuxtut.com/en/121e21df5904af4d281e/>.
- [80] „mplot3d tutorial — Matplotlib 2.0.2 documentation”, 2017. május 10., https://matplotlib.org/2.0.2/mpl_toolkits/mplot3d/tutorial.html.
- [81] asahidari, „Surf2stl.Py”, GitHub, 2020. május 2., <https://github.com/asahidari/surf2stl-python>.
- [82] Joshua Hrisko, „Python Datalogger - Using PySerial to Read Serial Data Output from Arduino”, Maker Portal, 2018. február 25., <https://makersportal.com/blog/2018/2/25/python-datalogger-reading-the-serial-output-from-arduino-to-analyze-data-using-pyserial>.
- [83] Brenda Make, „Optical Breadboard 6x6 1/4-20 Beta by BrendaEM by BrendaEM”, 2016. november 16., <https://www.thingiverse.com/thing:1896673>.
- [84] Markus, „Linear Stage by oet - Thingiverse”.
- [85] Markus.
- [86] Martin Korolczuk, „Stepper Motor: 28BYJ-48”, Autodesk Online Gallery, elérés 2022. április 8., <https://gallery.autodesk.com/projects/86268/stepper-motor-28byj-48?sarched=>.
- [87] Isaiaha Washington, „screw”, Tinkercad, 2019. március 22., <https://www.tinkercad.com/search>.
- [88] Kevin Schneider, „Limit Switch 10T85”, Autodesk Online Gallery, 2016. március 20., <https://gallery.autodesk.com/projects/38848/limit-switch-10t85?sarched=>.
- [89] Markus, „Linear Stage by oet - Thingiverse”.

-
- [90] Brian Schmalz, „Easy Driver Stepper Motor Driver”, Easy Driver Stepper Motor Driver, elérés 2022. március 13., <https://www.schmalzhaus.com/EasyDriver/>.
- [91] Components101, „28BYJ-48 - 5V Stepper Motor”, Components101, 2021. március 5., <https://components101.com/motors/28byj-48-stepper-motor>.
- [92] J3, „EASYDRIVER: 4-Wire-Stepper Motor Driver”, *Jungletronics* (blog), 2018. október 26., <https://medium.com/jungletronics/easydriver-4-wire-stepper-motor-driver-9f32b233efe6>.
- [93] Ted Mortenson, „Limit Switches Explained - Working Principles & Types | RealPars”, *PLC Programming Courses for Beginners | RealPars* (blog), 2020. október 19., <https://realpars.com/limit-switch/>.
- [94] Arduino Get Started, „Arduino - Limit Switch | Arduino Tutorial”, Arduino Getting Started, 2021, <https://arduinogetstarted.com/tutorials/arduino-limit-switch>.
- [95] *Send commands from Python to ESP32 via Serial - [Python & ESP32 with Serial, Part 1]*, 2021, <https://www.youtube.com/watch?v=I-3cRo7IId8>.
- [96] Ayush Jha, „PWM Pins”, *STEMpedia*, 2017. június 2., <https://thestempedia.com/docs/evive/arduino-core-interface/pwm-pins/>.
- [97] venomouse, „Reading limit switches using ESP32 not working for me :(”, Reddit Post, *r/arduino*, 2022. február 7., www.reddit.com/r/arduino/comments/sn2q0i/reading_limit_switches_using_esp32_not_working/.
- [98] The Pi Hut, „Turning on an LED with Your Raspberry Pi’s GPIO Pins”.
- [99] Gus, „How to Setup a Raspberry Pi Light Sensor”.
- [100] „Luminance | Photometric Brightness | Nit | Stilb | Apostilb | Blondel | Lambert | Footlambert | Skot”, elérés 2022. november 30., <https://www.schorsch.com/en/kbase/glossary/luminance.html>.
- [101] „International System of Units from NIST”, elérés 2022. november 30., <https://physics.nist.gov/cuu/Units/>.
- [102] „Techniques For Accessibility Evaluation And Repair Tools”, elérés 2022. november 30., <https://www.w3.org/TR/AERT/#color-contrast>.
- [103] „HSP Color Model - Alternative to HSV (HSB) and HSL”, elérés 2022. november 30., <https://alienryderflex.com/hsp.html>.
- [104] „Fókusz távolság (Fényképezés) - Meghatározás - Lexikon és Enciklopédia”, *MiMi*, elérés 2022. május 6., <https://www.mimi.hu/foto/fokusztaavolsag.html>.
- [105] Nagy Krisztián, „opticfigure8.gif (GIF Image, 800 × 325 pixels)”, elérés 2022. május 6., https://pixinfo.com/img/fotoelmelet/optika_3/opticfigure8.gif.
- [106] „Tárgy távolság (Fényképezés) - Meghatározás - Lexikon és Enciklopédia”, *MiMi*, elérés 2022. május 6., <https://www.mimi.hu/foto/targytaavolsag.html>.
- [107] Krisztián Nagy, „Fotóelmélet: Optika 3”, *Pixinfo.com* (blog), 2009. június 18., <https://pixinfo.com/cikkek/fotoelmelet-optika-3/>.
- [108] Gavan Mitchell, „Laser Dissector System”, School of Biomedical Sciences, 2021. október 26., <https://biomedicalsciences.unimelb.edu.au/departments/anatomy-and-physiology/research/services-anatomy-and-physiology/laser-dissector-system>.
- [109] „IEC 61966-2-1:1999 | IEC Webstore”, elérés 2022. november 30., <https://webstore.iec.ch/publication/6169>.
- [110] Adrish Dey, „Image Super Resolution Using ESRGAN | TensorFlow Hub”, TensorFlow, 2020. december 18., https://www.tensorflow.org/hub/tutorials/image_enhancing.
- [111] Alex Dopico, „How much does a laser szkenning confocal microscope cost? – JanetPanic.com”, 2019. február 10., <https://janetpanic.com/how-much-does-a-laser-szkenning-confocal-microscope-cost/>.
- [112] Brian Eliceiri, „Purchase of Confocal Laser Szkenning Microscope”, elérés 2022. április 21., <https://grantome.com/grant/NIH/S10-RR019445-01>.
- [113] Raspberry Pi Ltd, „Raspberry Pi 2 Model B”, Raspberry Pi, 2015. április 14., <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-2-model-b/>.
- [114] ESPRESSIF, „New Espressif Module ESP32-WROVER-B | Espressif Systems”, 2018. augusztus 6., <https://www.espressif.com/en/news/new-espressif-module-esp32-wrover-b>.
- [115] Components101, „28BYJ-48 - 5V Stepper Motor”.
- [116] Brian Schmalz, „Easy Driver Stepper Motor Driver”.

-
- [117] Michael Waskom, „Seaborn.Heatmap”.
- [118] Markus, „Linear Stage by oet - Thingiverse”.
- [119] Markus.
- [120] dr Ásványi Tibor, *Algoritmusok és adatszerkezetek I. előadásjegyzet* (ELTE, 2022), <http://aszt.inf.elte.hu/~asvanyi/ad/ad1jegyzet/ad1jegyzet.pdf>.