

BAGI BULCSÚ BENCE
TDK DOLGOZAT



BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR
MECHATRONIKA, OPTIKA ÉS GÉPÉSZETI INFORMATIKA TANSZÉK





BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR
MECHATRONIKA, OPTIKA ÉS GÉPÉSZETI INFORMATIKA TANSZÉK

BAGI BULCSÚ BENCE

TDK DOLGOZAT

Follow focus rendszer fejlesztése fényképező optikához

Konzulens:
Dr. Pizág Bertalan
adjunktus

Budapest, 2024.

Szerzői jog © Bagi Bulcsú Bence, 2024.

Tartalomjegyzék

Illusztrációk jegyzéke

1. Bevezetés	1
2. Irodalom kutatás	2
2.1. Objektívek, képalkotó rendszerek	2
2.1.1. Kamera obskura	2
2.1.2. Objektívek	2
2.1.3. Prime objektívek	3
2.1.4. Zoom objektívek	4
2.1.5. Fotóobjektívek	4
2.1.6. Cine objektívek	5
2.2. Fókusz rendszerek	5
2.2.1. Aktuátorok	5
2.2.2. Szensorok	7
2.3. Follow focus rendszerek	9
2.3.1. Feladatok	10
2.3.2. Aktuátorok	10
2.3.3. HMI-ek	11
2.3.4. Szensorok	12
2.4. Piacon fellelhető Follow focus rendszerek	12
2.4.1. Motor	12
2.4.2. HMI egység	12
2.4.3. LiDAR egység	13

3. Saját fejlesztésű eszköz	15
3.1. Koncepció	15
3.1.1. Eszközök	15
3.2. Központi egység	17
3.2.1. Mikrovezérlő	17
3.2.2. Teljesítmény elektronika	19
3.2.3. Kijelző és gombok	19
3.2.4. Csatlakozók	20
3.3. Aktuátor	20
3.3.1. Hajtás	20
3.3.2. Műszaki kialakítás	22
3.3.3. Visszacsatolás és szabályozás	23
3.3.4. Enkóder	23
3.3.5. Szabályozás	23
3.4. Szezorok	24
3.4.1. Távolság mérés	25
3.5. HMI-ek	27
3.5.1. Joystick	27
3.5.2. Bluetooth LE telefonos kapcsolat	28
3.6. Szoftveres felépítés	29
3.6.1. Szenzorok kezelése	29
3.6.2. LUT-ok kezelése	30
3.7. Fejlesztés menete	31
3.7.1. Áramkör	31
3.7.2. Fogaskerekek	32
3.7.3. Kalibráció	34
3.7.4. Validációs mérések	35
3.8. Fejlesztési lehetőségek	36
3.8.1. Zoom és apertúra kezelés implementálása	37
3.8.2. Hajtás fejlesztése	37
3.8.3. HMI és szenzor kínálat fejlesztése	37

3.8.4. Mikrovezérlő lecserélése	37
4. Összegzés	38
Irodalomjegyzék	39

Illusztrációk jegyzéke

2.1. Egy kamera osbkura amit a szobában készítettem	3
2.2. Objektív és okulár lencse működése	3
2.3. Fázisdetekciós szenzor működése	9
2.4. Follow Focus rendszerekhez használt kézikerek	11
2.5. DJI Focus PRO	13
3.1. A kamera és az objektívek már a rendszer adaptálva	17
3.2. Központi egység	18
3.3. Arduino MEGA	18
3.4. Akkumulátor	19
3.5. Vezérlő szervek	20
3.6. Folytonos forgású szervó	22
3.7. AS5600	24
3.8. VL53L1X	27
3.9. Távirányító	28
3.10. Bluetooth LE modul	28
3.11. A rendszer breadboardon összerakva	32
3.12. A NYÁK-lap terve	33
3.13. NYÁK lap	33
3.14. Fogprofil gyűrű rögzítések	34
3.15. Fókusz kalibrációs összeállítás	35
3.16. Fókusz validációs eredmények	36

1. fejezet

Bevezetés

Dolgozatom témájának egy follow focus rendszer fejlesztését választottam. A follow focus rendszereket elsősorban filmgyártásban használnak annak érdekében, hogy távolról tudjanak kezelni kameraobjektíveket. Ennek oka lehet a kamera nehéz elérhetősége - mondjuk egy mozgó jármű külsején - vagy a kamera kezelésének feladatainak megosztása.

Az elmúlt évtizedben az online videótartalmak elterjedésével, valamint a felhasználói elektronikai cikkek folyamatos fejlődésével, sok follow focus rendszer került piacra. Ezek a rendszerek képességeikben megközelítik a korábban csak filmgyártásban használt professzionális rendszerekét, olyan árkategóriában, amelyet kisvállalkozások is megengedhetnek maguknak.

A fejlesztés során egy Arduino mikrovezérlőt használtam a feladat megoldására. A programozáshoz az Arduino IDE fejlesztő környezetet használtam. Minden CAD és NYÁK tervezést az AUTODESK Fusion CAD környezetében végeztem.

2. fejezet

Irodalom kutatás

2.1. Objektívek, képalkotó rendszerek

Optikai képalkotó rendszerek alatt olyan rendszereket értünk, amelyek a fény útját oly módon módosítják lencsékkel, tükrökkel és egyéb optikai elemekkel, hogy a fény a céltárgyhoz hasonló attól mindössze csak kívánt módon eltérő képet alkosson. Célja, kialakítása és működési elve sokféle lehet.

2.1.1. Kamera obskura

A kamera obskura az elképzelhető legegyszerűbb képalkotó rendszer. Maga az egész kamera egy fénytől elszigetelt doboz vagy szoba, amelyen egyetlen kis lyuk található. Idealizált esetben beszélhetünk lyukkamera modellről, ahol a fénysugarak egyetlen végtelenül kicsi lyukon haladnak át. A lyukon keresztül a külvilág fejjel lefelé felvetődik a lyukkal szembe lévő falra. Nem ideális esetben a lyuk mérete meghatározza a vetített kép fényességét, valamint a képen kivehető legkisebb részlet méretét. Az anyag vastagsága, amibe a lyuk található, pedig a vetített kép méretét határozza meg. Kamera obskura esetében a kép minden pontja a rendszer által elérhető minimális foltmérettel képződik el, a tárgytávolságtól függetlenül, így nem lehet fókuszálásról beszélni[1].

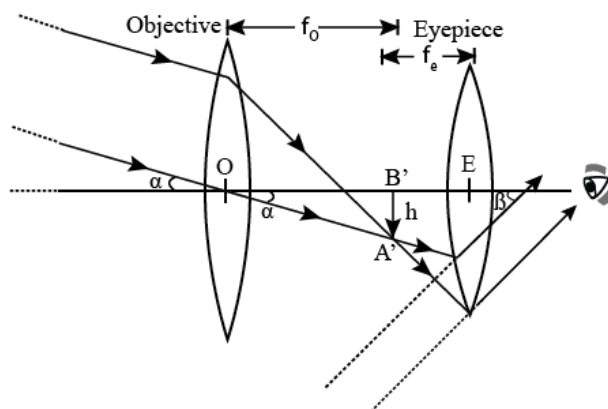
2.1.2. Objektívek

Az objektív egy valós képet létrehozó optikai rendszer. Az objektívek elengedhetetlenek a kamerákban és minden egyéb képalkotó rendszerben, mivel az információ rögzítéséhez szükség van az objektív által leképzett valós képre. A szemünk nem képes leképzett valós képet feldolgozni, így ilyen felhasználások esetén szükség van egy



2.1. ábra. Egy kamera osbkura amit a szobában készítettem

okulár lencsére is. Az objektív állhat egyetlen lencséből is, de manapság a korszerű objektívek több lencséből és ragasztott lencsecsoportból állnak. A dolgozatomban az objektív szó alatt nem csak az optikai rendszert fogom érteni, hanem az összes hozzá tartozó segédrendszert is[2].



2.2. ábra. Objektív és okulár lencse működése
[3]

2.1.3. Prime objektívek

Prime objektívek a fényképészetben és filmkészítésben használt képalkotó rendszereknek az egyik fajtája. Prime objektívnek nevezzük azt az objektívet, aminek a gyújtótávolsága állandó a működés során végig, tehát feltételezve, hogy a mezőrekesz mérete nem változik, végig ugyanakkora látószöget fog biztosítani[1]. Az objektíveken általában találhatóak vagy manuális vagy újabban egyre gyakrabban elektronikus rendszerek a tárgytávolság és a fényerősség állítására.

Mivel az objektív mereven rögzítve van a kamerához és azzal együtt a szenzorhoz, ezért az objektív rögzítési pontjától számolt képtávolságnak végig állandó kell, hogy legyen. A fókusz gyűrű segítségével a kamera kezelő be tudja állítani, hogy mekko-

ra tárgytávolság tartozzon fix képtávolsághoz. Régi objektívek estén erre a célra két koncentrikus, köböző menetemelkedésű menetet alkalmaztak, amelynek segítségével a fókuszgyűrű, forgatását finom hosszanti mozgássá tudták alakítani.

2.1.4. Zoom objektívek

A zoom objektívek általában igaz minden, ami a prime objektívekre is. Leszámítva, hogy a gyújtótávolságuk nem állandó. A gyújtótávolság állításával a képen rögzített látószög is változik. A kisebb gyújtótávolság nagyobb látószöget eredményez a képen. A zoom objektíveket a filmgyártásban azért szokták alkalmazni mivel olyan jelenetek rögzítését teszi lehetővé, amiket egy prime objektívvel nem lehet megvalósítani. Hatalmas hátrányuk a fix gyújtótávolságú objektívekkel szemben, hogy mind fényerejük mind optikai felbontásuk lényegesen rosszabb amellet, hogy általában drágábbak is [1][2].

Parfokáltság

Parfokálisnak nevezzük azt a zoom objektívet, aminél a gyújtótávolság állításával a tárgytávolság, ami a szenzorra leképződik, nem változik [4]. Ez a filmgyártásban azért fontos, mert különben a fókusztávolság állításával változna, hogy mi éles a képen és mi nem. Ezt elkerülendő a minőségi filmgyártásra szánt zoom objektívek tervezésénél kivétel nélkül ügyelnek a parfokáltságra.

2.1.5. Fotóobjektívek

Fotóobjektívek alatt az általánosságban fényképezésre tervezett objektíveket értjük. Ezek manapság a piacon található objektívek nagy részét jelentik mind legyártott példányszám, mind választék szempontjából. Ebből kifolyólag ár, minőség és kialakítás szempontjából is hatalmas tartományt fednek le a rendelkezésre álló lehetőségek.

Általánosságban az mondható el a fotóobjektívekről, hogy az optikai tulajdonságok és képminőség mellett nagyon sok egyéb szempont is szerepet játszik a fejlesztésük alatt. Ebből kifolyólag a mai fotóobjektívek igencsak fejlett beágyazott rendszerek az optikai tulajdonságaikon túl. Manapság hétköznapi felhasználók számára is elérhetőek olyan technológiák, mint az időjárás-állóság, elektronikus autófókusz, íriszvezérlés vagy az optikai képstabilizálás [2].

Jelenlegi fejlesztések iránya arra mutat, hogy a modern fotóobjektívek is kezdenek egyre kompetensebbek lenni videófelvételre, de ennek ellenére nem lehet egy kategóriába venni őket a filmgyártásban használt objektívekkel.

2.1.6. Cine objektívek

A filmgyártásban használt – úgynevezett cine, vagy cinematic – objektívek a mai napig is szinte kizárólag analóg kivitelben léteznek bármiféle belső elektronika nélkül. Ebből kifolyólag, a cine objektívek nem rendelkeznek optikai képstabilizálással, autófókusszal vagy focus-by-wire képességgel, valamint elektronikus apertúrákkal. A filmgyártásban használt objektívek rendszerint olyan kialakításban érkeznek, amelyeknél a fókuszt az írisz és a zoom mechanizmus mechanikusan ki van vezetve egy manuális gyűrűre az objektívházon. Ezek a gyűrűkön rendszerint található egy 0.8 modullal rendelkező fogaskerékprofil is[5][6].

A cine objektívekről általánosságban elmondható még, hogy igen nagy műszaki és optikai igényességgel vannak tervezve, valamint gyártva. Ebből kifolyólag élességük igen magas, és a legtöbb képalkotási hibára korrigáltak. Zoom cine objektívek esetében ügyelni szoktak arra, hogy parafokálisak legyenek valamit a fényerejük is állandó legyen a fókusztávolság tartományon keresztül. Ezek miatt a követelmények és elvárások miatt a cine objektívek ára is nagyon magas tud lenni.

2.2. Fókusz rendszerek

Egy objektíven vagy egyéb képalkotó rendszeren fókusztávolság alatt azt értjük, amikor a eszközt oly módon állítjuk, hogy a megfigyelni kívánt céltárgyat a rendszer pontosan a detektor síkjába képezi le. Így a detektor által létrehozott képen a céltárgy élesnek fog tűnni.

Egy fókusztávolság rendszer elsődleges feladata, hogy az optikai elemek megfelelő mozgásával a kívánt mértékben elmozgassák a céltárgy képét. Egy másodlagos feladat, ami manapság az aktuátorok kellő fejlettsége miatt egyre fontosabbá válik a mozgás mértékének meghatározásához szükséges adatok begyűjtése és feldolgozása.

2.2.1. Aktuátorok

Egy fókusztávolság rendszerben található motoros hajtóművekkel szemben sok különböző elvárást lehet meghatározni.

- Magas szögpontosság, a pontos beállítás érdekében.
- A szögsebesség is fontos, hogy a mozgási tartományt hamar át tudja járni.
- Alacsony akusztikai zajszint, hogy a videófelvételbe ne hallatszon be.

- Sima futás és rázkódásmentesség.
- Tolerancia külső mozgatásra, hogy a manuális fókusz esetében történő mozgatás ne károsítsa a hajtást.
- Hosszú élettartam karbantartás nélkül, valamint minden olyan egyéb szempont, ami gyakran felmerül egy tömegtermék esetén.

Sokszor nehéz és költséges olyan megoldást találni, amely képes a mindezeknek megfelelni. Nem is meglepő, hogy a piacon fellelhető termékekben szinte kivétel nélkül teljesen egyedi tervezésű motoros hajtóműrendszerek találhatók.

Manuális fókusz

Manuális fókusznak az nevezzük amikor a fókuszálás feladatát a felhasználó látja el. A manuális fókuszra a legtöbb objektív lehetőséget ad egy fókuszgyűrűn vagy más módon keresztül.

Régebben ezt a feladatot egy heklóiddal oldották meg. A heklóid a fókusz gyűrű forgó mozgását, két eltérő menetemelkedésű menet segítségével alakítja át a teljes optikai csoport haladó mozgásává. Így változtatva annak távolságát a detektortól, ezzel változtatva azt, hogy milyen messze lévő tárgyak tűnnek élesnek.

Leptetőmotorok

A leptetőmotorok olyan aktuátorok amelyek képesek pozíció-visszacsatolás nélkül is pontos pozíció beállásra, majd ezt a pozíciót adott nyomatékkal tartani. Működési elvük azon alapszik, hogy az állórészben több tekercs található, annak állításával, hogy mely tekercsek kapnak áramot, pontosan be lehet állítani az állórész által keltett mágneses mező irányát, és ezáltal a forgórész pozícióját. A motor tényleg lépésszáma különböző műszaki megoldásoknak köszönhetően többször akkora mint a tekercsek száma.

Előnyük, hogy nagy beállási pontosságot és nyomatékot biztosítanak. Hátrányuk, hogy nincs módjuk arra, hogy megállapítsák, ha egy külső erő elforgatta őket, vagy ha egy végálláson felütközött a motor. Egy másik hátrányuk, hogy nyugalmi állapotban is lényeges áramot vesznek fel.[7].

Minden hátrányuk ellenére egyedi fejlesztésű és különleges kialakítású leptető motorokat találunk sok mai objektív autófókusz rendszerében.

Szervók

Szervók pozíció vagy sebesség szabályozással ellátott, kis holtjátékú, nagy pontosságú motorok[8]. De nagy általánosságban egy szervó szó alatt a pozíció szabályozott változtatott értik. Szervók irányítása általában pulzus hossz állítás segítségével történik.

A pozíció szabályozott szervók nagy előnye a nagyon magas szögpotosságuk, és az egyszerű szoftveres és hardveres kezelésük. Nagy hátrányuk ezzel szemben, hogy korlátozott a mozgási tartományuk és a legtöbb esetben nem 180 vagy 270 fokot tudnak megtenni két végállás között.

Piezo motorok

A piezo motorok a piezoelektromos hatást kihasználva hoznak létre forgó mozgást. Ezek a motorok nagyon nagy szögpotosságot és nagyon alacsony zajszintet biztosítanak, ami kifejezetten alkalmassá teszi őket optikai alkalmazásokra [7]. Hátrányuk, hogy csak limitált nyomatékot és szögsebességet képesek leadni.

Focus-by-wire

Focus-by-wire rendszerekről akkor beszélünk, ha egy objektíven a manuális fókuszhoz tartozó gyűrű vagy egyéb interfész nem áll mechanikai kapcsolatban fókusz mechanizmussal. Általában ezt úgy oldják meg, az interfészen valamilyen szenzor van, amelynek jelével irányítják az autó fókuszhoz tartozó motort. Ennek általában gyártási költséghez kapcsolódó okai vannak, mivel az objektíveben található motor és hajtómű lényegesen egyszerűbb tud lenni, ha nem kell számolni egy lehetséges külső behatással.

2.2.2. Szenzorok

A megfelelő szenzorok használata elengedhetetlen egy fókuszrendszer automatizálásában. Annak függvényében, hogy a szenzorok a kívánt céltárgy távolságát mérik-e, vagy a már az optikai rendszer által leképezett kép élességét figyelik, beszélünk aktív vagy passzív autófókusz rendszerekről [9] [10].

Aktív autófókusz rendszerek valamilyen módon megméri a távolságot a céltárgyhoz. Majd egy az objektívhez specifikusan tartozó táblázat vagy tömb – általában az ilyen célú táblázatokat Lookup Table-nek (LUT) szoktuk nevezni - segítségével elmozdítja a motort a megfelelő pozícióba. Irányítástechnikai szempontból az aktív autófókusz rendszerek tekinthetők vezérlésnek, mivel a beavatkozáshoz - a fókusz állításához

-, csak a bemeneti értéket - céltárgy távolsága - vesszük alapul, a kimenetet nem - a leképzett kép élessége.

Az aktív fókuszálás feladata lényegesen megbonyolódik, ha az objektív nem parafokális mivel ilyenkor a LUT elkészítése és olvasása közben is figyelembe kell venni a tárgytávolság mellett az objektív, aktuális gyújtótávolságát is.

Passzív autófókusz rendszerek az optikai rendszer által leképzett képnek az élességét vizsgálják, majd annak függvényében mozgatják az optikai elemek az objektívben a megfelelő élesség elérése érdekében. Irányítástechnikai szempontból a passzív autófókusz rendszerek tekinthetők szabályozásnak mivel a kimeneti jel függvényében állítják a beavatkozó jelet.

Mint látható a passzív autófókusz rendszerek lényegesen univerzálisabb és robusztusabb megoldást nyújtanak az aktív rendszerekhez képest. Nem csoda, hogy a gyakorlatban soha sem voltak különösen elterjedtek az aktív rendszerek, de manapság már csak különleges esetekben használják.

Ultrahangos, és ToF

Aktív autófókusz rendszerek esetében gyakran használnak valamilyen repülési idő alapú távolság mérési módszert. Attól függően, hogy a hanghullámok, vagy a fény visszatérési idejét használjuk beszélünk különböző szenzorokról.

Az Ultrahangos távolságmérés a legnépszerűbb módja a hangalapú távolságmérésnek. Ilyenkor a szenzor kibocsát egy - emberi füllel nem hallható frekvenciájú - hanghullámot, és méri a visszatéréséhez szükséges időt. A hang viszonylag magas disszipációja miatt ennek a mérési tartománya igencsak korlátozott.

A fény repülési idején alapuló távolság mérést ToF-nak (Time of Flight) szokták nevezni. Ekkor hanghullám helyett egy fényimpulzus visszaverődési idejét mérik. A fény jobb koncentrálhatósága és nagyobb terjedési sebessége miatt lényegesen nagyobb pontosságot és mérési tartományt lehet elérni ToF rendszerekkel, mint a hangalapúakkal[11].

A LiDAR (Light Detection And Ranging) rendszerek is - amit a filmgyártásban szoktak használni aktív fókusz rendszerekhez - a távolság mérést ToF alapon végzi.

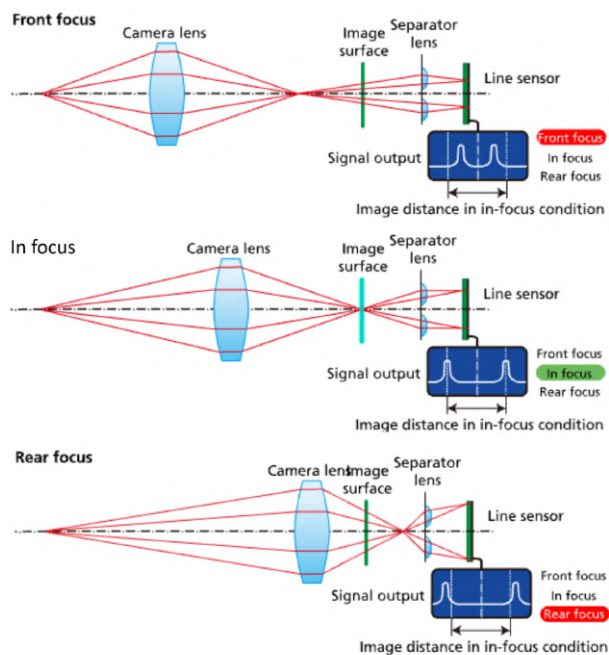
Kontraszt alapú

A passzív autófókusz rendszerekhez leggyakrabban használt és legköltséghatékonyabb megoldás a kontraszt alapú fókusz érzékelés. Ebben az esetben a szenzor vizsgálja a leképezett képet és megállapítja, hogy a fókuszrendszer mely pozíciójánál lehet a legnagyobb kontrasztot elérni a leképezett kép vizsgált tartományán.

Ebben az esetben a rendszer csak a kép élességét vizsgálja, a tárgytávolságot vagy a fókuszrendszer jelenlegi pozícióját nem, így nem kell a kamerában található rendszereket adaptálni különböző objektívekhez, valamint a rendszer ugyanúgy működik előtét lencsékkel, telekonverterekkel, valamint makró gyűrűkkel[10].

Fázisdetekció alapú

Passzív autófókusz rendszereknél a másik gyakran használt fókusz érzékelési mód a fázisdetekciós. Ebben az esetben a rendszer az objektív két különböző részéről érkező fénysugarakat hasonlít össze a képtávolságon túl, ahol segédlencsék segítségével egy vonaldetektorra fókuszálja a képet. A két külön kép távolsága alapján meg tudja határozni, hogy a kép a vizsgált pontban éles-e [12]. Fázisdetekciós fókusz keresésnek a nagy előnye, hogy az élességen túl azt is meg tudja állapítani, hogy mennyiben a kép életlen, akkor a céltárgy az aktuális képsík előtt vagy mögött helyezkedik el. Valamint, hogy nagyjából mennyivel tér el, ezzel lényegesen meggyorsítva a fókuszkeresés és motorvezérlés folyamatát.



2.3. ábra. Fázisdetekciós szenzor működése
[13]

2.3. Follow focus rendszerek

Follow focus rendszerek nagyon sokszor szerepet kapnak a filmgyártás során. Fejlettségüktől függően lehetővé teszik a felvétel minőségének javítását, a lehetséges

kompozíciók és jelenetek számát, valamint a megnöveli a munkahely biztonságát a kamera körül dolgozó személyzet számára. Ezt úgy éri el, hogy átveszi az objektív fizikai állításának feladatát az operatőrtől[14].

Az objektív mozgatását a cine objektíveken található 0.8 modulú fogaskerék profilra kapcsolódva hajtja meg az abban található fókusz mechanikát. Amennyiben egy objektív nem rendelkezik gyárilag ilyen profillal akkor valamilyen utólagos módot kell találni ennek a profilnak az objektívra erősítéséhez.

Follow focus rendszerekből léteznek teljesen mechanikus kivitelek is, amelyek feladata mindössze annyi, hogy egy objektív eredeti kezelőszervét egy az operatőr számára kényelmesebb pozícióba helyezze át, ezek nem nyújtanak lehetőséget távvezérlésre vagy valódi munkamegosztásra.

2.3.1. Feladatok

Egy follow focus rendszer számtalan különböző szituációban, hasznos lehet egy forgatás során amikor szükség van összetett kamera kezelésre, vagy valamilyen komplex szituáció során történik a forgatás.

Az egyik legáltalánosabb ilyen szituáció, amikor a kamerának és az operatőrnek követnie kell a színészt, ilyenkor kihívást jelenthet az operatőr számára, hogy egyszerre ügyeljen a kompozícióra és a fókuszálásra. Erre megoldásként szoktak alkalmazni, egy távvezérlővel ellátott follow focus rendszert. Így az operatőrnek csak a kompozícióval kell foglalkoznia, és a fókuszálással pedig egy másodlagos operatőr foglalkozik távolról irányítva az objektívet. Ugyanennek a szituációnak a szélsőséges esete amikor a kamera egy mozgó jármű külsejére, vagy egy drónra van erősítve, ilyenkor nincs is mód arra, hogy biztonságosan hozzáférjen az operatőr az objektívhez.

2.3.2. Aktuátorok

Follow focus rendszerekhez használt aktuátorokra nagyjából ugyanazok a szempontok vonatkoznak, mint az objektív autófókusz rendszerekhez használtakhoz. A leglényegesebb különbség, hogy fontosabb a maximális nyomaték, mivel nem lehet tudni, hogy az adott motor milyen objektívvel lesz párosítva. Így az elképzelhető legnagyobb terhelésre kell felkészíteni.

2.3.3. HMI-ek

Follow Focus rendszereket az ipari filmgyártásban általában kézi távirányítással használják. Ennek az az oka, hogy a filmgyártás során eredendően sok egyedi szituáció van, így nehéz megbízhatóan automatizálni a folyamatokat. Különösen úgy, hogy egy rosszul felvett jelenet hatalmas anyagi és időbeli költséggel tud járni. Sokszor jobban megéri a feladatokat egy képzett szakemberre bízni ahelyett, hogy megpróbálják automatizálni azt[15].

Ebből kifolyólag a filmgyártásban a follow focus rendszerek irányításához általában nem hagyományos szenzorokat, hanem ember-gép interfészeket (Human-Machine Interface vagy HMI) használnak. Ezek valamilyen emberi kimenetet alakítanak a számítógépek számára is érthető jellé.

Follow Focus rendszerek esetében a leggyakrabban használt HMI egy potméter szerű kézikerek, amelynek forgatásával lehet irányítani a follow focus rendszert. Ennek a megoldásnak az a hatalmas előnye, hogy azokon a begyakorolt és izommemóriába berögződött mozdulatokon támaszkodik, amiket az az operatőr évek során megtanult, így gyorsan hozzá tud szokni, a kezelő.

Ennek gyakran része egy hengeres filctábla felület a kézikerek mellett, ennek az a szerepe, hogy az operatőr fel tudja jegyezni egy adott tárgy távolság a kerék mely állásánál éles, ez lényegesen meg tudja pontosítani egy operatőr munkáját.



2.4. ábra. Follow Focus rendszerekhez használt kézikerek
[16]

2.3.4. Szenzorok

Kisebbségi költségvetésű filmek, vagy videók forgatásánál előfordul, hogy egy kamerára csak egy operatőr jut, ilyenkor azokat a feladatokat, amiket alaphelyzetben egy másik operatőr kezelne valamilyen szenzorral delegált rendszernek delegálják. Ilyen feladatok közé szokott tipikusan tartozni a fókuszálás, amit általában a kamera autófókusz rendszere kezel, vagy amennyiben a kamera vagy az objektív nem képes autófókuszra, akkor egy follow focus rendszer kezeli ezeket.

Amennyiben egy follow focus rendszer látja el az autófókusz feladatát akkor szinte kivétel nélkül egy aktív fókuszrendszerrel beszélünk. Ebben az esetben szükség van valamilyen távolságmérő szenzorra. Ez az esetek többségében valamilyen ToF alapú szenzor, de sok esetben teljes LiDAR szenzor, amely lehetővé teszi a célpont követését, a képen keresztül különböző irányokban, nem csak egy irányba, mint egy hagyományos ToF szenzorral.

2.4. Piacon fellelhető Follow focus rendszerek

A piacon fellelhető elektronikus follow focus rendszerek közül, a kínai DJI vállalat Focus Pro rendszerét mutatom be. Azért erre esett a választásom egyrészt, mert ez volt az a termék, ami legtöbb inspirációt nyújtotta számomra saját rendszerem tervezése és fejlesztése közben. Személyes véleményem szerint ez a termék és a hozzá tartozó kiegészítő kínálat reprezentálja a legjobban a jelenlegi félprofi kategória csúcsát.

2.4.1. Motor

A rendszerhez tartozó motor teljes nevén DJI Focus Pro Motor, egy teljesen önálló működésre képes egység. Az egységben integrálva van egy akkumulátor tápellátás céljából, a motoros hajtómű, a motor szabályozásához szükséges összes elektronika, valamint egy rádióantenna ahhoz, hogy távvezérelni is lehessen.

Sajnos a DJI nem tett közzé semmilyen technikai információt a motor és a hajtómű pontosabb műszaki tulajdonságáról, sem public relations csatornáikon, sem semmilyen hivatalnak a termékről benyújtott publikusan elérhető hivatalos dokumentumban. Valamint a megkeresésekre sem válaszoltak.

2.4.2. HMI egység

Az eszközhöz két különböző HMI egység is elérhető.



2.5. ábra. DJI Focus PRO
[17]

A DJI Focus Pro Grip mely az alap csomagnak is része, egy központi vezérlő egységként és egy fogantyúként is funkcionál azon túl, hogy egy HMI. Az egységen egy tárcsa található, amely a kezelő mutatóujjához esik, és amelynek segítségével irányítani tudja a follow focus rendszert.

A DJI Focus Pro Hand Unit egy feláras HMI eszköz, ami az iparban általánosan használt potméter szerű tárcsákra hasonlít. Ebbe a kézikerébe egy motor is be van építve annak érdekében, hogy állítható mértékű ellenállást tudjon biztosítani, valamint képest autófókusz mód közben jelezni a fókusz gyűrű forgásának mértékét. Ezen az eszközön a kézikeréken túl egy lineáris csúszó bement is található, így az eszközzel több objektív gyűrű is vezérelhető egyszerre. Az eszközbe egy rádió is integrálva van annak érdekében, hogy akár 160 méteres távolságból is leshessen vezérelni a rendszert.

2.4.3. LiDAR egység

A rendszerhez tartozik egy külső LiDAR egység, ami lehetővé teszi az autófókusz funkciót, a szenzor 76800 darab egyedi mérési ponttal rendelkezik, emellett képes 30 Hz-

es mérési frekvenciára. A mérési tartománya egészen 20 méterig terjed. A rendszer egy beépített kamerával működik együtt, így képes képfeldolgozás javítani a célpontkövetést és ezáltal a mérési pontosságot.

3. fejezet

Saját fejlesztésű eszköz

3.1. Konceptió

A célom a fejlesztés alatt az volt, hogy egy olyan follow focus rendszert készítek, ami lehető legjobban teljesítse a feladatát, valamint emellett a lehető legnagyobb mértékig moduláris és rugalmasan beállítható legyen. Azaz igény szerint képes különböző számú és típusú motort és szenzort kezelni anélkül, hogy a kódot vagy a hardvert - egy csatlakozó bekötésénél nagyobb mértékben - módosítani kéne.

Mindenképpen szerettem volna, ha képes szimultán három motor kezelésére, annak ellenére, hogy nincs a birtokomban olyan objektív, amin használni lehetne három motort egyszerre. Ezt azért szerettem volna, mivel egy teljesen manuális zoom objektívnek éppen három állítógyűrűje van és a jövőben bővíteni tudjam a rendszert oly módon, hogy képes legyen zoom és apertúra kezelésre is.

Ezek mellett mivel egy teljesen saját célra és költségvetésből készül a rendszer, ezért az is egy fontos szempont volt, hogy a lehető legköltséghatékonyabb megoldásokat találjam meg, a felmerülő problémákra.

3.1.1. Eszközök

A dolgozat készítése során erősen támaszkodtam a rendelkezésemre álló eszközparkra, mind a kamera, mind az objektívek terén. Ugyanakkor a feladat során törekedtem arra, hogy minél általánosabb megoldást adjak a problémára és minél kevésbé támaszkodjak bármiféle kamera vagy egyéb eszköz által nyújtott egyedi technológiára.

Kamera

A fejlesztés során végig a rendszert egy Canon 5D Mk. II fényképezőgépre fogom integrálni. Ez egy teljes képmezős fényképezőgép, amelyet a Canon 2008-ban dobott piacra. A gép képes 21 megapixeles állóképek vagy full HD mozgóképek rögzítésére, mivel a follow focus rendszerek többnyire a filmgyártásban használatosak, így a kamera állóképkészítő képességeit nem fogjuk mélyen taglalni a dolgozat hátralévő részében. A kamera a széles körben használt Canon EF bajonettel van szerelve.

A kamera el van látva egy kilenc fókuszponttal rendelkező fázisdetekciós passzív autófókusz rendszerrel. Azonban ez a rendszer üzemképtelenné válik a videórögzítési üzemmód bekapcsolásával, mivel a szenzorok a reflextükör segítségével működnek, amely videó rögzítéskor lecsukódik így fázisdetekciós szenzorokra nem képződik le fény. Ekkor egy képfeldolgozáson alapuló, kontrasztalapú rendszer veszi át a feladatot. Ez a rendszer sokkal lassabb a fázisdetekciónál, de ami a nagyobb probléma, hogy kizárólag videó rögzítés előtt üzemképes felvétel indítása után teljesen működésképtelenné válik. Ez a képességbeli hiány volt a kezdeti motiváció a feladat választásához és a rendszer kifejlesztéséhez.

Objektívek

Három objektívet választottam, amiket a feladat során integrálni fogok a follow focus rendszerbe. Ezeket leginkább a különböző műszaki és optikai tulajdonságaik alapján választottam, hogy minél jobban reprezentálják a piacon fellelhető objektívek összességét, ezáltal minél több objektívhez adaptálható legyen a rendszer, minimális módosítással.

Az első objektív, amit választottam, az a Canon 50 mm f1.4 USM. Ezt elsősorban azért választottam mert a nagy apertúrája miatt képes nagyon szűk mélységélességet elérni, így ez az autófókusz rendszernek legnagyobb kihívást jelentő objektív. Egy másik fontos tulajdonsága, hogy ugyan nem használ semmiféle focus-by-wire technológiát, de a fókusztartomány végállásain túl lehet tekerni a fókuszgyűrűt és nem fog soha felütközni, hanem szabadon lehet tekerni bármely irányba.

A második objektív a Canon 14-40 f4 L. Ez az egyetlen zoom objektív a három közül, ezt pont azért választottam, hogy zoom kezelés is megvalósítható és kipróbálható legyen a rendszeren. Ez az objektív parfokális, ami sokat egyszerűsít az objektív fókusz és zoom gyűrűjének szimultán kezelésében. Ennek az objektívének is a 50mm f1.4-hez hasonlóan a fókuszgyűrűje nem ütközik fel, de a zoomgyűrű igen.

Az utolsó objektív, amit választottam az egy, a két előzőnél jóval öregebb Helios-44-M4. Ez a két másikkal ellentétben eredetileg nem is Canon EF bajonetthez lett gyártva

így használatához egy adapterre van szükség, valamint ebben semmilyen autófókusz-rendszer nem található. Ezt az objektívet azért választottam mert ennek a fókuszgyűrűje felütközik a tartomány végén.



3.1. ábra. A kamera és az objektívek már a rendszer adaptálva

15mm rudak

A videó és filmgyártás iparágában a kamerákhoz tartozó különböző segédeszközök - külső monitorok, follow focus rendszerek, akkumulátorok, fogantyúk stb. - rögzítésére számtalan szabadalom van. Ezek közül az egyik leginkább elterjedt a 15 milliméteres külső átmérőjű rúd, amelyre rá lehet hossza mentén szorítani szabadon bármilyen kiegészítőt. A fejlesztés során is ilyen 15 milliméteres rudakkal kompatibilisre terveztem a műszaki megoldásaimat.

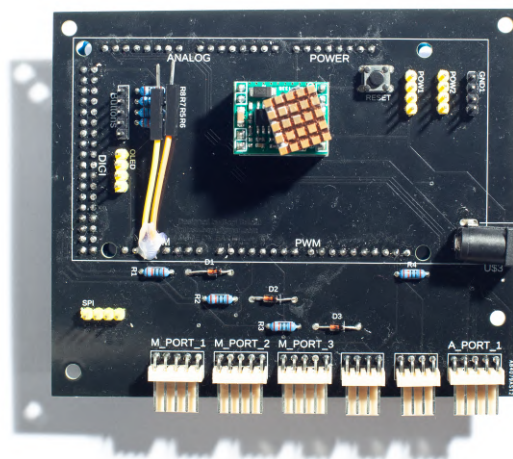
A 15 mm rúdon kívül még a dolgozat során használtam rögzítésre vakupapucsot és $\frac{1}{4}$ hüvelykes csavar is, ezek mindegyike szintén szokványos rögzítési módnak számít a területen.

3.2. Központi egység

Központi egységnek nevezem azt az eszközt a rendszerben, ami magában foglalja a mikrovezérlőt, tápcsatlakozót és a teljesítményelektronikát, az összes perifériához tartozó csatlakozót, a képernyőt és a gombokat, valamint az ezeket összekötő NYÁK-lapot, és az egyéb egyes működtetéséhez szükséges kiegészítő elektronikát.

3.2.1. Mikrovezérlő

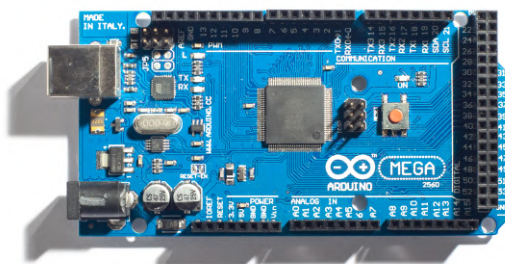
A dolgozat elvégzéséhez az Arduino mikrovezérlő családot választottam. Elsődleges ok a döntésem mellett az volt, hogy nagy tapasztalatom van a termékcsaláddal,



3.2. ábra. Központi egység

és a C++ alapú fejlesztési környezetével, így gyorsan tudok benne fejleszteni és nem kellett egy új termékhez hozzászoknom. Másodlagos indok pedig, hogy az Arduino termékcsaládhoz számtalan segítségnyújtó forrás és szabadon elérhető könyvtár található, amely megkönnyíti a perifériák illesztését, valamint a hibakeresés folyamatát.

Eredetileg egy Arduino NANO mikrovezérlőt terveztem használni a feladatra, de hamar egyértelművé vált, hogy a mikrovezérlőn rendelkezésre álló memória (2 kB) nem lesz elegendő. Ekkor váltottam az Arduino MEGA 2560 R3 modellre, ami lényegesen több program és dinamikus memóriával rendelkezik (8 kB, a kész program számra körülbelül 3 kB szükséges). A memórián túl gyakorlatilag minden más releváns erőforrásból többen rendelkezik, mint a NANO.



3.3. ábra. Arduino MEGA

3.2.2. Teljesítmény elektronika

A rendszer áramellátását egy egyenáramú tápegység aljzaton keresztül kapja, amelyet 7 és 20 voltos feszültség között lehet meg táplálni. Innen ez a feszültség egyenesen a mikrovezérlő táplá bára megy - ami hat és húsz volt közötti feszültséget igényel – valamint egy step-down feszültségszabályozóba, ami egy öt voltos forrásfeszültséget biztosít minden eszköznek a mikrovezérlőn túl annak érdekében, hogy óvja a mikrovezérlőt az azon áthaladó nagy áramoktól.

A rendszerhez tartozik kettő darab sorosan kapcsolt 18650-es Li-ion akkumulátor melyek együtt 7.2 voltot képesek biztosítani. A rendszer ellátására ezek tökéletesen alkalmasak, de a tesztek többsége alatt egy hálózati tápegységről láttam el a rendszert árammal, kényelmi okokból, valamint, hogy minimalizáljam a cellák ciklusainak számát.



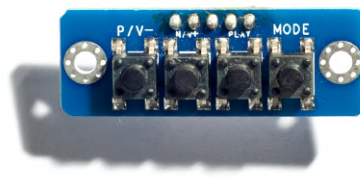
3.4. ábra. Akkumulátor

3.2.3. Kijelző és gombok

A rendszer beállítása és üzemeltetése egy képernyő és gombsor segítségével történik. A képernyő egy 196x32 pixel felbontású OLED panel, amely az I2C kommunikációs protokoll segítségével vezérelhető. A gombsor pedig egy négy gombból álló modul, amely nem tartalmaz lehúzó ellenállásokat így azokat nekem kellett hozzáadnom a NYÁK-on.



(a) Oled kijelző



(b) Gombsor

3.5. ábra. Vezérlő szervek

3.2.4. Csatlakozók

A központi egység több különböző célú és kivitelű csatlakozót is tartalmaz. A mikrovezérlőn található egy USB Type B csatlakozó, amit a mikrovezérlő felprogramozásához kell használni. A NYÁK hosszú oldal mentén elhelyezésre kerültek NSL25 típusú csatlakozók. Négy darab öt pólusú csatlakozó található, amelyből három motorok fogadására alkalmas, míg a negyedik analóg beviteli eszközökére. A két darab négy pólusú csatlakozóra bármilyen 5 volt tápfeszültségű I2C kommunikációs protokollal rendelkező szenzor kapcsolható.

A csatlakozókon túl még tüskesorokat és tüskesoraljzatokat is elhelyeztem a központi egységen. A tüskesor aljzat a step-down feszültség szabályozónak biztosít helyet. Ezen kívül van egy-egy tüskesor a földpotenciálnak, 5 voltnak és a tápfeszültségnek. A képernyő és a gombsor is tüskesorokon keresztül csatlakozik a központi egységhez.

Ugyan jelenleg nem használlok semmilyen SPI kompatibilis szenzort, de egy erre alkalmas tüskesort is tettem a NYÁK-ra. Sajnos soros kommunikációhoz szükséges tüskesort elfelejtettem tervezni az NYÁK-ra így azt utólag két kábel felforrasztásával kellett pótolnom.

3.3. Aktuátor

Az aktuátor talán a legfontosabb és kritikusabb része egy follow focus rendszernek, így a dolgozattal eltöltött időnek nagy részét ennek a modulnak a fejlesztésével töltöttem.

3.3.1. Hajtás

A hajtással szemben támasztott elvárásaim eléggé megnehezítették már a fejlesztés első lépését is, a motorválasztást. A legfontosabb kritérium a jelenlegi felhasználási esetben az, hogy nagy pontossággal legyen képes beállni egy kívánt pozícióba. Ezen

kívül fontos, hogy a motor kellően nagy tartományban tudjon mozogni, hogy olyan objektíveket is tudjon kezelni, amelyeknél valamelyik gyűrűnek hosszú az útja két végállás között. Ezenkívül fontos a nyomaték is, mivel az objektívek üzemeltetése egy ember számára nem jelent nehézséget, de egyes mikrómotoroknak meghaladhatja a képességét. Ezek mellett az is fontos, hogy a tengely fordulatszáma egy kezelhető tartományban legyen 120 fordulat/perc környékén.

Ezek a követelmények jelentősen lecsökkentették a lehetséges elektromos motorok csoportját, amelyek alkalmasak a feladatra. A két megmaradó lehetséges opció a léptető motorok és a szervók.

Léptető motor

A léptető motorok papíron látszólag tökéletesen megfelelnek a feladat követelményeinek. Igen magas beállási pontosságuk, viszonylag nagy nyomatékot tudnak biztosítani alacsony fordulatszám mellett, valamint nincs végállásuk sem tehát akármekkora végállás közötti elfordulást is képesek kezelni.

A problémát a piacon fellelhető léptetőmotorok okozták. A két méretben nagyjából megfelelő, könnyen és olcsón hozzáférhető léptetőmotor a 28BYJ-48-5V, valamint a NEMA 17. Mindkettőt elvetettem végül, különböző okokból.

A 28BYJ-48-5V motort volt lehetőségem tesztelni. A tesztelés végére arra az eredményre jutottam, hogy a biztosított nyomaték nagy valószínűséggel nem lenne elegendő a feladat elvégzésére. Valamint a maximális fordulatszám is kevés a jelenlegi felhasználási esethez. Így ki kellett zárnom ezt a motort a lehetőségek közül.

A NEMA 17-es motort is el kellett vetnem, mint lehetőséget. Ezt viszont nem azért, mert nem lett volna képes teljesíteni a feladatot, hanem azért, mert a mérete és tömege az összes szükséges vezérlő elektronikával együtt túl nagy lett volna ahhoz, hogy a kamerával együtt egy kényelmes, kezelhető rendszert eredményezzen a projekt végén. Valamit a léptető motorok áramfelvétele miatt, a hűtés, valamint a tápellátás is újabb problémákat okozott volna.

Szervó motor

A mikroszervók is sok szempontból megfelelő megoldást kínálnak a problémára. A piacon könnyen és kedvező áron elérhető 9g szervók méretben és teljesítményben is megfelelőek lenének a feladathoz. Az egyetlen probléma, a piacon elérhető 9g szervomotorokkal, hogy a forgási tartományuk végállások között 180 fok. Nagy elfordulással rendelkező objektív gyűrűknél szükséges lehet a motoron lévő fogaskerék méretének

növelése. Ezzel viszont a működtetéshez szükséges nyomaték is megnő, valamint az az elérhető beállási pontosság is csökken. Ezekből fakadóan úgy döntöttem, hogy hagyományos szervókat sem fogok használni a feladat megoldására.

Folytonos forgású szervó motor

A hagyományos szervomotorokon kívül léteznek még folytonos forgású szervomotorok – időnként szokás őket CR szervónak vagy – megtévesztő módon- 360 fokos szervónak is nevezni. Ezek a hagyományos szervókkal ellentétben nem pozíciószabályozással, hanem szögsebesség szabályozással vannak ellátva. Ezen kívül külső méretük, nyomatékuk, maximális szögsebességük és vezérlési módjuk is nagyjából azonos a nem folytonos forgású társaikkal.

Hatalmas problémát okoz viszont a feladat szempontjából, hogy a folytonos forgású szervók nem képesek pontos pozíciókövetésre, ami megkerülhetetlen követelmény egy follow focus rendszer esetében. Ennek a problémának a megoldása érdekében azt a döntést hoztam, hogy egy forgó enkóder segítségével visszacsatolom a tengelyelfordulás mértékét egy szabályozó körbe, így lehetővé téve a szükséges szögelfordulás szabályozását.

Amennyiben a pozíció szabályozást már magamnak fejleszttem felmerülhet, hogy miért nem használok egy hagyományos egyenáramú motort a folytonos szervó helyett. A fő indok erre az, hogy a folytonos szervóban sok minden eleve integrálva van, amelyek egy DC motorban nem feltétlenül. Ide tartozik lassító hajtómű, a PWM segítségével állítható áramellátás, és az előre kialakított tengelykötési lehetőség.



3.6. ábra. Folytonos forgású szervó

3.3.2. Műszaki kialakítás

A hajtóegység kialakításának központjában a folytonos forgású mikroszervó található és a hozzá kapcsolódó hajtó fogaskerék. Tengelykötésként a szervóhoz eredetileg

gyártott csavaros rögzítésű konzolokat használtam, majd a fogaskereket a konzolhoz erősítettem csavarokkal. Fogaskerék közepén, a szervóval átellenes oldalán elhelyezésre került egy diametrikus irányban mágnesezett korongmágnes is. A mágnessel közvetlen szemben található a mágneses enkóder, ami a visszacsatolásért felel.

A modul alsó részén a házban található egy kis áramkör, aminek a feladata mindössze annyi, hogy a beérkező vezetékot szétossza a megfelelő módon az enkódernek, valamint a szervomotornak.

A modul CAD modellje paraméteresen lett megcsinálva, tehát néhány perc alatt hozzá lehet igazítani egy kívánt fogaskerék mérethez. A fogaskerék minimális méretét az enkóder IC-hez tartozó NYÁK mérete limitálja.

A ház alsó pontján még helyet kapott egy 15 milliméteres rúdra rögzítésre alkalmas szorítókötés is. Így a modul alkalmas arra, hogy gyakorlatilag bármilyen filmgyártásban használt kamera összeállításra rögzíthető legyen.

3.3.3. Visszacsatolás és szabályozás

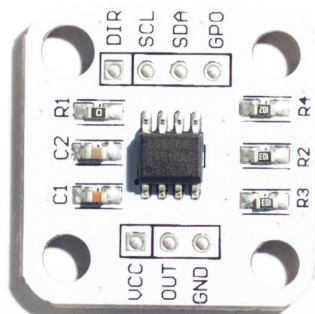
Mivel folytonos mozgású szervókat használok így gyakorlatilag elkerülhetetlen, hogy valamilyen pozíció visszacsatolásos szabályozást használjak nagy pozíció pontosságú beállítás eléréséhez.

3.3.4. Enkóder

A pozíció visszacsatolás megvalósításához szükséges egy forgó enkóder vagy valamilyen egyéb mód az elfordulás mérésére. Erre a célra egy AS5600 mágneses enkódert választottam. Megfontoltam még mechanikus, illetve optikai enkódereket is, de ezek vagy árban, vagy felbontásban jelentettek volna lényeges, kompromisszumot a mágneses enkóderhez képest. Az enkódernek 12 bites felbontása van, azaz egy teljes fordulat alatt 4096 különböző diszkrét elfordulást tud megkülönböztetni. Mért eredményeket I2C kommunikáción keresztül továbbítja, vagy 10 biten egy analóg vagy PWM jelen keresztül, habár ezeket a funkciókat nem használtam ki mivel a kapott analóg eredményt lényeges hiba és zaj terhelte a digitális jelhez képest.

3.3.5. Szabályozás

Az enkóder által biztosított pozícióadatok önmagukban nem alkalmasak a használatra. Ennek a fő oka az, hogy az enkóder egy fordulaton belüli abszolút pozícióértéket ad



3.7. ábra. AS5600

viszsa, tehát amennyiben egy fordulatonál nagyobb mozgás tartományt szeretnénk kezelni, szükség lesz a kumulált pozíciószámítására. Ezt úgy oldottam meg, hogy amennyiben az előző pozíciómerés óta megtett szögelfordulás egy előre megszabott értéknél nagyobb, akkor a referencia ponthoz képesti megtett fordulatok számát tartó változót inkrementálom vagy dekrementálom annak függvényében, hogy melyik irányba történt az értékbeli ugrás. Ez a referencia érték úgy lett megválasztva, hogy normál működés közben ne fordulhasson elő, hogy a motor a küszöbértéket meghaladva fordulna el két mérés között.

A szabályozás maga egy egyszerű P-szabályzón keresztül történik. Ami az aktuális pozíciót használja referencia jelnek, és a kimeneti jelnek pedig a szervót vezérlő jelet használja. Ilyen szempontból tekinthető a rendszer egy kaszkád szabályozásnak is, mivel a mikroszervóban található egy beépített szabályozó kör is, ami a saját bemeneti változója függvényében fogja szabályozni motorhoz jutó áramot.

3.4. Szezorok

A rendszer moduláris célkitűzéséből kiindulva, szerettem volna, ha többféle szenzort rugalmasan és könnyen lehet csatlakoztatni a rendszerhez. A feladat jellegéből kiindulva tudtam, hogy valószínűleg csak távolság mérésre lenne szükség.

3.4.1. Távolság mérés

A dolgozat kitűzött céljának eléréséhez elengedhetetlen egy autófókusz rendszer integrálása a fejlesztett follow focus rendszerbe. A korábban tárgyalt megkötések miatt egy passzív alapon működő autófókusz rendszer szinte teljesen megvalósíthatatlan. Így az egyetlen járható út autófókusz integrálására egy aktív rendszer.

Aktív autófókusz rendszernek elengedhetetlen feltétele a folyamatos távolságmérés valamely formája, amelynek pontossága a mélységélességnél kisebb. Erre azért van szükség, hogy amikor az objektív beáll a mért tárgytávolságra akkor a céltárgy ténylegesen benne legyen a képnek az éles tartományában. Ez a probléma csökkenthető azzal, ha az objektív apertúráját szűkebbre állítjuk ezáltal megnövelve az éles tartomány mélységét, és csökkentve a szükséges szenzor pontosságát.

A fejlesztés során több különböző távolságmérési szenzort és technológiát is leteszteltem és tapasztalataim alapján a feladatra legalkalmasabb eszközt implementáltam.

Ultrahangos távolság mérés

Korábbi projektemből adódóan, volt eszközöm is és tapasztalatom is az ultrahangos távolságméréssel. A tesztek elvégzése során egy HC-SR04 szenzort használtam.

A legnagyobb előnye az ultrahangos távolságmérésnek az én esetemben, a könnyű implementáció az Arduino környezetben, mivel semmilyen külső könyvtárat vagy kommunikációs protokollt nem igényel a rendszer. A szenzor használat közben csak a `pulseIn()` függvényen alapszik, ami visszaadja a függvény hívása és egy adott lábra érkező jel közötti időt mikroszekundumokban.

Sajnos több probléma is felmerült a tesztelés során, amelyek kizárták az ultrahangos távolságmérést a lehetőségek közül. A legnagyobb ilyen probléma a mérési tartomány volt. A műszer az esetek nagy részében nem volt képes stabil mérési eredményeket biztosítani 2 méternél nagyobb távolságok esetén, ami lényegesen le tudja limitálni a lehetséges szituációkat, amikor lehetne használni a szenzort. Ez a probléma valamilyen mértékben orvosolható lehetett volna egy drágább és jobb minőségű ultrahangos szenzor használatával, de a lényegesen drágább modelleknek sem több a mérési tartományuk 4-5 méternél.

Egy másik kisebb probléma az érzékelővel a méréshez szükséges idő. Mivel a mérés a hang terjedési sebességén alapszik így a mérendő távolsággal – a feldolgozási időt nem számolva – lineárisan növekszik. A mérési időtartam nagyobb távolságoknál igencsak problémát tud okozni különösen azért, mert a méréssel párhuzamosan valós idejű szabályozási feladata is van a mikrovezérlőnek. És ez tovább fokozódik amennyiben több egymásutáni mérést szeretnénk végezni a mérési hibák kiszűrése érdekében. Ez

probléma orvosolható, ha a szenzor jelfeldolgozását egy interrupt alapú függvényrel kezeljük. Ezáltal elveszíti a könnyű implementációból származó vonzóságát a megoldás.

Time of flight távolság mérés

ToF alapú szenzorokat is teszteltem a távolságmérés feladatra. A ToF szenzoroknak megvan az előnyük az ultrahangos távolságméréssel szemben, hogy nagyobb távolságban működnek, és mivel a fény terjedési sebessége a sokkal nagyobb a hang terjedési sebességénél így a távolság növekedésével nem növekszik lényeges mértékkel a mérési idő - olyan távolságoknál, ami egy autó fókusz rendszerénél releváns.

Egy hátránya a ToF szenzoroknak az ultrahanggal szemben, a szenzorok komplexitásából adódóan mindegyik I2C-t – vagy valamilyen egyéb kommunikációs protokollt - használ. Így a jelek kiolvasására komolyabb szoftveres háttérre van szükség, vagy valamilyen előre elkészített könyvtárat kell használni. Azért van szükség a kommunikációs protokollt használó megoldásra, mivel a ToF méréshez szükséges - nagyon futásidő érzékeny - számításokat ne a mikrovezérlőnek kelljen végeznie. Szerencsémre mind a két ToF szenzorhoz létezett jól dokumentált, jól működő könyvtár Arduino környezethez.

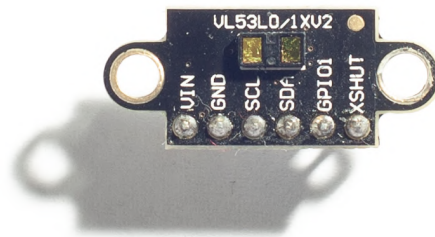
Az első ToF szenzor, amit teszteltem egy VL53L0X ennek a hatótávja nagyjából egy méterrel haladta meg az ultrahangos szenzorét, valamint a mérési stabilitásban és a külső zajtollerancia szempontjából is lényegesen jobb volt annál. A javuló hatótáv ellenére még mindig úgy éreztem, hogy a mérési tartományt limitálná az eszköz felhasználhatóságát.

A második érzékelő, amit teszteltem egy VL53L1X volt. Ez egy valamennyivel drágább változata az előző szenzornak nagyobb mérési tartománnyal és több beállítható paraméterrel, így jobban a pontos felhasználási módhoz tudtam igazítani a szenzort. Végül ezt a szenzort választottam a feladathoz mivel a mérési tartomány és idő már használhatónak ítélttem meg, egy szobában történő forgatás esetéhez.

Egy a fényképező vakupapucsához kapcsolódó tartó segítségével rögzítettem a műszert a kamerához. A kialakítás miatt csak egy végtelen messze lévő tárgy esetén egyezne a mért pont a rögzített kép középpontjától, de az a kisméretű eltérés, ami van az esetek túlnyomó többségében nem okoz problémát.

LiDAR

Felmerült lehetőségként, hogy egy LiDAR szenzort használjak a távolságmérési feladatra. A szenzor nagy előnye lenne, hogy mivel nem csak egy mérést végez egy irányban, hanem mátrixszerűen több különböző irányba több mérést, sok lehetőséget adna az adatok feldolgozására.



3.8. ábra. VL53L1X

Ezt az ötletet azonban elvetettem az adatfeldolgozás és szoftveres integráció nehézsége, valamint a szenzorhoz kapcsolódó magas költségek miatt.

3.5. HMI-ek

Az ember gép interfészek, kritikus elemei egy igazi follow focus rendszernek. Ezért is készítettem a rendszerhez kétféle HMI-t. Annak érdekének, hogy minden esetben a lehető legjobb és a helyzethez legmegfelelőbb eszköz álljon rendelkezésére.

3.5.1. Joystick

A rendszerhez készítettem egy kézi, vezetékes távirányítót. Ez a távirányító egy ps2 típusú joystickkel van ellátva és a központi egység analóg csatlakozójához kapcsolódik. A szenzor inicializálásakor felvesz egy zéró pozíciót. Erre azért van szükség, mivel az általam használthoz hasonló változó ellenállás alapon működő potméterek és joystickek hajlamosak arra, hogy az öregedésük során változzon az ellenállásuk, így elmozduljon a nulla pozícióhoz tartozó mért feszültség érték.

Az eszköz kétféle módban konfigurálható, egy pozíció és egy sebesség irányító módon. pozíció irányítás esetében a motor a joystick pozíciójának megfelelő pozíciót igyekszik beállítani az objektív gyűrűn. Sebesség irányítás esetén a joystick kitérése az motor célértékének változásának a sebességét befolyásolja.

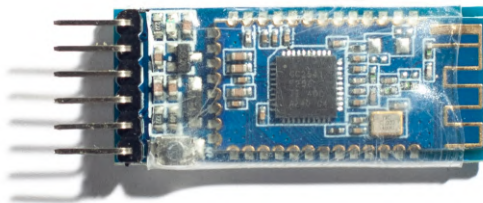
A távirányító tervezésénél nagy szerepet kapott az eszköz ergonómiája. A lehető legtermészetesebb és kényelmesebb forma elérése érdekében, a távirányító házának formáját felületmodellezéssel terveztem meg. A végleges forma több különböző teszt-személy véleménye szerint is kényelmes lett.



3.9. ábra. Távirányító

3.5.2. Bluetooth LE telefonos kapcsolat

A piacon elérhető Follow focus rendszerek egyik legfontosabb funkciója, a vezeték nélkül távvezérlés lehetősége. Az általam fejlesztet rendszer is lehetőséget ad a vezeték nélküli távvezérlésre. A választott vezeték nélküli adatátviteli mód a Bluetooth LE. Ezt a mikrovezérlő egyik soros portjára csatlakoztatott adóvevővel tudjuk megvalósítani. Az általam választott adóvevő egy AT-09 BLE típusú egység



3.10. ábra. Bluetooth LE modul

A szoftveres integrációhoz a `BluetoothSerial.h` könyvtárat választottam. Ennek a könyvtárnak a legnagyobb előnye, hogy beépített támogatással rendelkezik a Bluetooth Serial Connect iOS applikációval, így egy iOS eszközről Bluetooth-on keresztül lehet vezérelni a rendszert. Az applikációban a kezelőfelület egy képernyőn megjelenő joystick, így a távvezérlést hasonló élményt nyújt, mint a kézi joystick-kal ellátott HMI esetében.

Sajnos az említett könyvtár nem működött teljesen hibamentesen abban a környezetben, ahol azt implementálni szerettem volna, ezért néhány kisebb módosítást kellett végrehajtanom a publikusan elérhető könyvtáron ahhoz, hogy a kívánt működést el-

érjem. Ezeket a módosításokat visszajeleztem a nyílt forráskódú könyvtár fenntartója számára.

3.6. Szoftveres felépítés

Mivel a rendszer irányítására az egy Arduino mikrovezérlőt választottam így a legkézenfekvőbb fejlesztőkörnyezet az Arduino IDE (Integrated Development Environment). Ez egy ingyenesen elérhető nyílt forráskódú fejlesztőkörnyezet, amely Arduino mikrovezérlőkhöz lett tervezve specifikusan. Az IDE beépített támogatást biztosít kód szerkesztésre, különböző mikrovezérlőkre való fordításra és program feltöltésére, könyvtárak keresésére és telepítésére, valamint soros kommunikáció kezelésére.

Minden Ardudio C++ alapú kódot futtat. Az egyik nagy különbség a szabványos C++ és az Arduino által használt változat között, hogy a mikrovezérlők nem támogatnak néhány modernebb memória igényes funkciót a nyelvben, így azokat nem lehet implementálni. A másik lényeges különbség a kiterjed `arduino.h` könyvtár jelenléte. Ez a könyvtár számtalan olyan előre implementált függvényt tartalmaz, amely megkönnyíti a mikrovezérlő digitális és analóg I/O lábainak kezelését, időfüggvények kezelését, soros kommunikáció elvégzését és még sok egyéb feladatot.

3.6.1. Szenzorok kezelése

Mivel a motorokat példányosítva egy `MOTOR` tömb formájában kezelek és minden motornak a többitől függetlenül kell tudnia kezelnie a hozzá rendelt szenzort. Így programtervezési szempontból arra jutottam, hogy a motor objektumnak a szenzor objektumát, egy pointer formájában adom át. Ez a pointer publikus elérésű annak érdekében, hogy a főprogramból is lehessen hívni az adott motorhoz tartozó szenzor objektumot. Mivel a különböző szenzorok különböző kezelőfüggvényeket igényelnek így nem implementálhattam őket egy fajta objektummal. Ennek a problémának a megoldására létrehoztam egy `SENSOR` absztrakt osztályt, minden különböző implementált szenzor osztálya ennek az absztrakt osztálynak a leszármazottja. Ebből kifolyólag minden szenzor objektumnak birtokolnia kell azokat a függvényeket - amelyekre a működés közben hivatkozom – amik `SENSOR` absztrakt osztályban definiálva lettek.

Az absztrakt osztályban deklarált függvények az inicializálást, a mérési adat lekérdezést és a működéshez fontos információk lekérdezését végzik. Függvényeken túl még az absztrakt osztály a `name` [11] karaktertömb létezését is előírja. Erre ezért van szükség, hogy a menüben meg tudjon jelenni az egyes szenzorok neve.

```

1 class SENSOR {
2 public:
3     char name[11];
4
5     virtual double get_measurement() = 0;
6     virtual bool is_fast() const = 0;
7     virtual bool needs_lut() const = 0;
8     virtual void setup_menu();
9     virtual ~SENSOR() {}
10 };
11
12 class JOYSTICK : public SENSOR {
13 private:
14     uint8_t a_pin;
15     int zero_val;
16
17 public:
18     JOYSTICK(const char* initName, int port_num);
19     void setup_menu() override;
20     bool is_fast() const override;
21     bool needs_lut() const override;
22     double get_measurement() override;
23 };

```

3.1. Programkód. Absztrakt SENSOR osztály és egy példányosítható leszármazott osztály

3.6.2. LUT-ok kezelése

Szenzorok kezelésekor valamilyen kapcsolatot kell teremteni a mért fizikai mennyiség, és az objektív elfogatása között. Erre egyik mód lehet a kapcsolat valamilyen fajta zárt alakú közelítése. Ezzel az a probléma, hogy sokszor az objektív gyűrűk nem szabályos vagy könnyen közelíthető karakterisztikával rendelkeznek. Így azt a megoldást választottam, hogy egy Look Up Table formájában tárolom el a kapcsolatot.

Az általam használt LUT-ok tíz lebegőpontos értékpárt tudnak tárolni. A programban az összes LUT egy háromdimenziós mátrixba összefűzött formában van tárolva. Amikor egy táblázatot hozzárendelünk egy motorhoz, a háromdimenziós mátrixnak csak a megfelelő oldala lesz átmásolva. A tizenegyedik értékpár minden egyes lapon az adott objektív gyűrűvel kapcsolatos információt tárolja, amelyet a LUT átmásolásakor szintén kiolvas a MOTOR objektum

```

1 void MOTOR::attach_lut(int lut_to_attach) {
2     for (int i = 0; i < lut_size_x; i++) {

```

```

3   for (int j = 0; j < 2; j++) {
4       LUT[i][j] = LUTs[lut_to_attach][i][j];
5   }
6   }
7
8   if (LUTs[lut_to_attach][lut_size_x][0]) {
9       hard_end = true;
10  } else {
11      hard_end = false;
12  }
13  ring_type = LUTs[lut_to_attach][lut_size_x][1];
14  }

```

3.2. Programkód. Absztrakt SENSOR osztály

3.7. Fejlesztés menete

A fejlesztés közben folyamatosan az végeláthatatlanul elem kerülő problémákból folyamatosan tudtam tanulni és fejlődni, ahogy a projekt félésztese haladt előre.

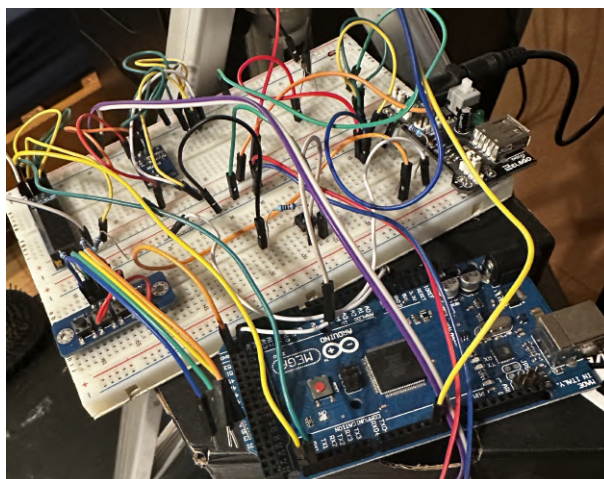
3.7.1. Áramkör

Az áramkör megfelelő kialakítása korán egy kritikus feladat, mivel az egyes perifériákat csak a megfelelő bekötés mellett lehet kezelni és tesztelni.

Breadboard

A fejlesztés első felében az áramkört egy úgynevezett breadboardon vagy próbapanelen állítottam össze. A próbapanel lehetővé teszi, hogy forrasztás nélkül mindössze kábelek bekötésével, építsünk kisméretű áramköröket. Ez lényegesen fel tudja gyorsítani a fejlesztés menetét mivel percek alatt lehet változtatásokat eszközölni és tesztelni áramkörökben.

A próbapaneles fejlesztés hátrányai közé tartozik, hogy kifejezetten sérülékeny, mivel az alkatrészek akár kis mozdulatok hatására is ki tudnak esni a helyükről. Valamint, hogy csak furatszerelt alkatrészeket lehet a rendszerbe integrálni. Ezen túl a sok kábeles összeköttetés miatt komplex hálózatok hamar átláthatatlanná és terjedelmessé nőnek.



3.11. ábra. A rendszer breadboardon összerakva

NYÁK tervezés és gyártás

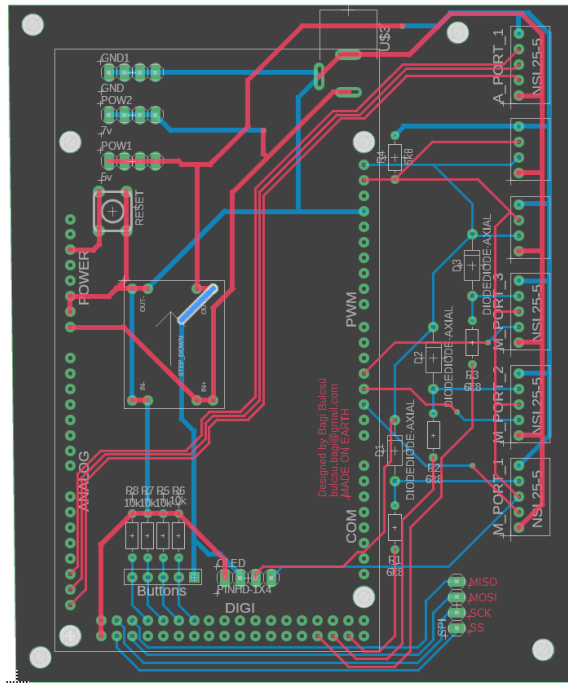
Az áramkör fejlesztésének a próbapanelt követő szakasza a nyomtatott áramkör – vagyis NYÁK - tervezése és gyártása. A nyomtatott áramkör segítségével kisebb, kevésbé sérülékeny és stabilabb lett a rendszer. Maga a NYÁK lap a mikrovezérlő felett helyezkedik el és tűkcsorok segítségével csatlakozik az Arduino tűkcsoraljzataihoz. Az összes aljzathoz tartozik egy tűske a NYÁK-on, azokhoz is, amelyeket nem használom a rendszerben és nincsenek bekötve sehova. NYÁK rögzítését a műszerházhoz, és a mikrovezérlőhöz csavarok segítségével oldottam meg.

A tervezés első lépésében egy stilizált kapcsolási rajzban kellett meghatároznom a kívánt, kapcsolást egyes alkatrészek között. Majd, amikor a kívánt kapcsolást összeállítottam meg kellett választanom a NYÁK kívánt fizikai méretét és az alkatrészek helyét a NYÁK-on. Ezt követően a vezető sávokat kellett megszabnom a NYÁK két oldalán.

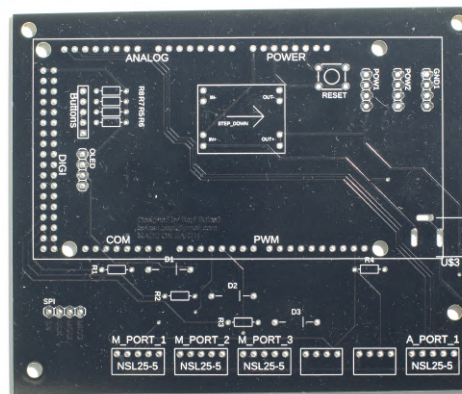
A kész tervekről egy internetes felületen keresztül árajánlatot tudtam kérni, és meg tudtam rendelni a gyártásukat. Kiszállítás után fel kellett szerelnem az összes alkatrészt az áramköri lapra. A tervekben tudatosan csak furatszerelt alkatrészeket használtam, mivel felületszerelt alkatrészeken beszereléséhez nincs sem eszközöm, sem képességem. Szerencsére azon kívül, hogy elfelejtettem a soros kommunikáció számára egy csatlakozót kivezetni, más komoly hibát nem vétettem NYÁK tervezése és gyártása közben.

3.7.2. Fogaskerek

A fogaskerek biztosítják a közvetlen fizikai kapcsolatot az objektívek és az aktuátorok között.



3.12. ábra. A NYÁK-lap terve



3.13. ábra. NYÁK lap

A fogaskerek fogszáma minden általam adaptált objektív esetében 79 volt és az általam készített aktuátor esetében 43. Ezeket a fogsámokat, vagy áttéteket a rendszer megfelelő működése szempontjából nem kötelező használni, mivel a rendszer automatikusan adaptálódik bármilyen áttétre. Az általam használt hajtásoknál 1.33 modult használtam a fogaskerekéknél, azért nem az iparban elterjedt 0.8-as modult, mivel a rendelkezésemre álló gyártási technológiák nem engedték meg a kisebb részletek kellő pontosságú gyártását.

A fogprofil kialakításához az evolvens profilt egy három pontján meghatározott spline görbével közelítettem. Ugyan ezzel eredendően egy hibát viszek be tervezés során,

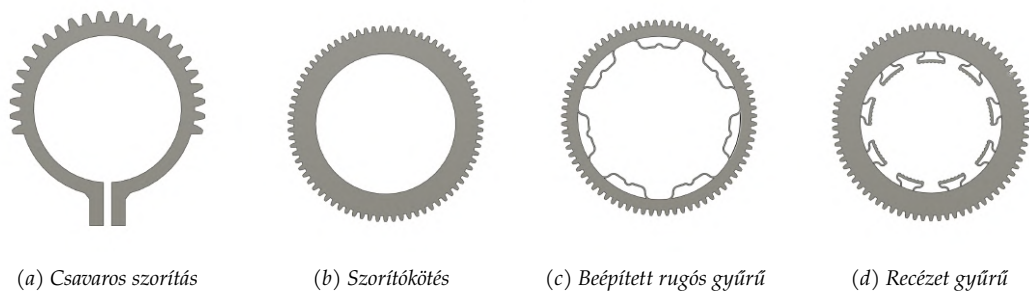
de a gyártástechnológia eredendő pontatlansága, lényesen nagyobb, mint a tervezésből adódó.

Nagy problémát okozott a fogprofilal rendelkező tárcsa rögzítése az objektívhez. Eleinte egy csavar segítségével történő szorító rögzítéssel próbálkoztam. Ez a megoldás több problémát is okozott, a leglényegesebb azt volt, hogy az objektív elforgatásához szükséges nyomaték lényegesen megnőtt a csavar rászorítását követően. Egy másik kevésbé lényeges probléma volt, hogy a fogaskerék profil nem ért teljesen körbe, ez önmagában nem lenne egy kritikus probléma mivel a működés közben a fogaskerékpár nem tesz meg több egymást követő fordulatot. Ugyanebből a tényből származik, hogy általában elvárt fogszámok relatív prímisége sem egy releváns szempont jelen fogaskerék párok esetében.

Az ezt követő megoldás egy szoruló kötés volt, amellyel a megfelelő manuális igazítást követően el lehet érni, hogy stabilan az objektíven maradjon a tárcsa, a mechanika túlzott megszorítása nélkül.

Ennél egy fejlettebb és elegánsabb megoldás amikor a tárcsában integráltam egy rugót, ami lehetővé tette, hogy rugalmasan illeszkedjen a tárcsa az objektívhez. Ez a megoldás csak a két Canon objektív esetén működik, mivel ezeknek vannak gumírozva az állító gyűrűi. A Helios esetében a fém állító gyűrűk recességéhez igazodó felületet alakítottam ki a tárcsán.

A kész fogaskerekek láthatóak 3.1 ábrán.



3.14. ábra. Fogprofil gyűrű rögzítések

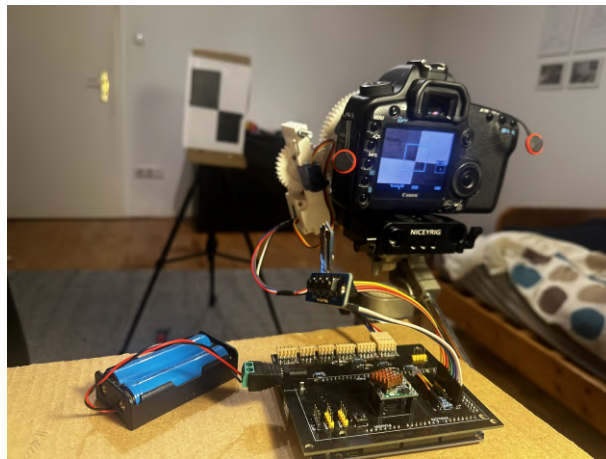
3.7.3. Kalibráció

A műszer megfelelő működéséhez elengedhetetlen az objektívek kalibrálása. A kalibrálás jelen kontextusban arra utal, hogy az objektívek állítógyűrűi és az általuk beállított értékek közötti kapcsolatot kimérjük és egy táblázatban – vagy más szóval Look Up Table-ben – összegyűjtjük. Ezeket a kimért LUT-okat használja a program a működés közben a szenzor által mért értékek feldolgozásakor.

A mérés során, először rendszer megtalálja az objektívgyűrű szélső állapotait, majd lekapcsolja a motorokat. Eközben az enkóder bekapcsolva marad és folyamatosan frissíti és visszajelzi az aktuális pozíciót. Eközben a kezelő feladata, hogy az egyes mérési pontokban tekerje az objektívet, és rögzítse az ott mért eredményeket.

Fókusz kalibráció

A fókusz kalibráció során nem az objektíven jelölt névleges tárgytávolság értéket vettem alapul. A kalibrációs méréshez készítettem egy nagy kontraszt átmenetű tesztábrát, amelyen pontosan be tudom állítani a kép élességét. A mikor egy mérési pontban sikerült pontosan beállítani az élességet, feljegyzem a pozíció valamint megmérem a céltárgy távolságát a kameraszenzor síkjától.



3.15. ábra. Fókusz kalibrációs összeállítás

3.7.4. Validációs mérések

A rendszer működésének kvantitatív értékeléséhez fontos, hogy valamilyen módon számszerűsíteni lehessen azt. Ennek a megvalósításához készítettem egy-egy kiértékelő MATLAB szkriptet, az automata apertúra állításhoz, valamint az automata fókusz állításhoz.

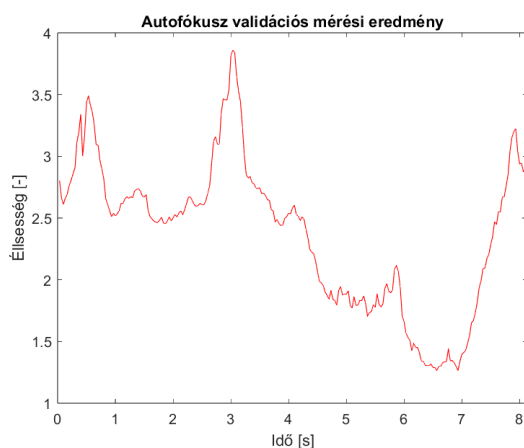
Ezek a szkriptek bemeneti információként kizárólag egy, a kamera által rögzített tesztfelvételt kapnak. Így a kimeneti eredményt kizárólag a felvétel minősége befolyásolja.

Fókusz validáció

A fókusz automatizálásának célja, hogy a céltárgy folyamatosan éles legyen a felvételen. A problémát az okozza, hogy a legtöbb módszer által nyújtott eredmény nem csak az élességtől függ, hanem a kép összetettségétől is.

Valamit egy másik – könnyebben orvosolható - probléma az, hogy a képnek nem a globális élessége fontos, hanem a céltárgy élessége.

Ezeknek a problémáknak a megoldására, a tesztfelvétel során a fókusz kalibrálásához használt tesztábra kamerától való távolságát változtattam, miközben az autófókusz rendszer ezt próbálta lekövetni. A feldolgozó szkriptben először egy objektumkövető módszer segítségével követtem a tesztábra közepét, majd az a középpont körüli 141*141 pixeles tartományt kivágom és azon végzem el az élesség kiértékelését gradiens számítás segítségével. Ezzel az eljárással egyszerre érem el lokális élesség meghatározást, valamint a képkomplexitás időben állandóan tartását. A kiértékelt teszteredmények a 3.16 ábrán láthatóak.



3.16. ábra. Fókusz validációs eredmények

3.8. Fejlesztési lehetőségek

A fejlesztés során sok olyan részlet volt, amit nem volt módom kifejleszteni, ezek a fejlesztések kétségtelenül egy jobban működő rendszert eredményeznének, ha implementálva lennének. Sok különböző oka volt annak, hogy ezeket a fejlesztési lehetőségeket nem implementáltam, anyagi, időbeli és a számítókapacitásbeli megkötések voltak a leggyakoribbak.

3.8.1. Zoom és apertúra kezelés implementálása

A jövőben mindenképpen szeretném ha a follow focus rendszer képes lenne kezelni fókuszgyűrűn túl az objektívek zoom és apertúra gyűrűit is.

Ez lényegesen meg tudná növelni az eszköz hasznosságát. És egy teljes follow focus rendszerré válna a projekt.

3.8.2. Hajtás fejlesztése

A hajtás mind hardveres, mind szoftveres szempontból fejleszteni kellene. Mivel a fejlesztés során sokszor úgy éreztem, hogy a konstrukció határait feszegetem.

A legfontosabb fejlesztés a hajtáson egy jobb motoros hajtómű kiválasztása lenne mivel a jelenlegi nyomatéka időnként kevésnek bizonyul. Egy nagyobb teljesítményű motor orvosolhatná ezt a problémát. Megoldás lehetne egy nagyobb folytonos forgású szervó, vagy egy különleges kisebb méretű léptető motor. A nyomatékon túl még a motor által termelt az akusztikai zaj is lényegesen meghaladja az adott alkalmazáshoz ideális mennyiséget.

Szoftveres szempontból a szabályozáson kellene finomítani, mivel a rendszer igen csak hajlamos túllövésekre, valamint a referenciaérték körüli oszcillálásra, különösen kisebb csillapítású objektívgyűrűk esetében. Erre a problémára a P helyett egy PD szabályozó megoldást jelenthet.

Egy harmadik fejlesztési lehetőség a hajtáson az enkóder lecserélése, az AS5600-ról a AS5600L-re mivel annál már az I2C cím a felhasználó által programozható, így az enkóderek közötti váltásra használt segédáramkört elhagyható lenne.

3.8.3. HMI és szenzor kínálat fejlesztése

A HMI-k és szenzorokkal kapcsolatban a legnagyobb fejlesztési lehetőség, az integrált lehetőségek parkjának bővítése lenne. Minél több különböző szenzor és HMI lenne integrálva a rendszerhez, annál valószínűbb, hogy minden operatőr és kezelő megtalálná az adott szituációhoz és személyes preferenciához legmegfelelőbb megoldást.

3.8.4. Mikrovezérlő lecserélése

Nagy mértékben megnőne az eszköz fejlesztési lehetőségeinek száma, ha egy lényegesen erősebb mikrovezérlővel cserélnénk le a jelenlegi Arduino MEGA-t. Megnyílna a lehetőség számításigényesebb megoldások implementálására is, mint a képfeldolgozás.

4. fejezet

Összegzés

A dolgozat során az általam fejlesztett follow focus rendszer tervezését, fejlesztését és tesztelését mutattam be, annak minden akadályával és sikerével együtt.

A végleges eredmény minden tervemet és elvárásomat felülmúlta. Nagy projektek kezdetén az ember hajlamos lényegesen nagyobb terveket készíteni, mint amit ténylegesen meg tud valósítani, ebből kifolyólag én is úgy kezeltem a saját kezdeti terveimet, hogy mindössze egy felső korlátja lesz a lehetséges végeredményeknek.

A dolgozat írása közben, amikor visszareflektáltam az elvégzett munkára jöttem rá, hogy az általam fejlesztett rendszer, egy valódi mechatronikai projekt volt. Ahol a gépészmérnöki, villamosmérnöki és informatikai megoldások egymással szinergikus kapcsolatot alkotnak. A feladatot nem tudtam volna megoldani a három közül bármely ismeret hiányában. A dolgozaton túl képzésre is reflektálva azt is észrevettem, hogy hány különböző tárgyból tanult ismeret kellett feladat során felhasználnom.

Irodalomjegyzék

- [1] A. Adams, *The camera*. Little, Brown, twenty-sixth paperback printing ed., 2021.
- [2] S. F. Ray, „Developments in photographic lenses,” *The Photogrammetric Record*, vol. 14, pp. 712–728, 04 1994.
- [3] Prasanna, „Ray optics and optical instruments class 12 important extra questions physics chapter 9,” 03 2021.
- [4] F. Yang, H.-I. Lin, M. Y. Shalaginov, K. Stoll, S. An, C. Rivero-Baleine, M. Kang, A. Agarwal, K. Richardson, H. Zhang, J. Hu, and T. Gu, „Reconfigurable parfocal zoom metalens,” *Advanced Optical Materials*, vol. 10, no. 17, p. 2200721, 2022.
- [5] F. Usui, J. Hosoya, K. Ito, and L. Thorpe, „A new hd cine zoom lens for digital motion pictures,” *SMPTE Motion Imaging Journal*, vol. 114, pp. 383–395, 10 2005.
- [6] F. Usui, R. Kamata, and L. J. Thorpe, „Lens considerations for digital cinematography,” *SMPTE Motion Imaging Journal*, vol. 124, pp. 28–43, 01 2015.
- [7] A. Bojtos, *2023-Szenzortechnika-(BMEGEMIBMSZ)-12 Aktuatorok*. BME MOGI Tanszék, 2023.
- [8] T. Hsia, „A new technique for robust control of servo systems,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 36, pp. 1–7, 01 1989.
- [9] X. Zhang, F. Fan, M. Gheisari, and G. Srivastava, „A novel auto-focus method for image processing using laser triangulation,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 64837–64843, 2019.
- [10] X. Xu, Y. Wang, X. Zhang, S. Li, X. Liu, X. Wang, and J. Tang, „A comparison of contrast measurements in passive autofocus systems for low contrast images,” *Multimedia Tools and Applications*, vol. 69, pp. 139–156, 2014.
- [11] A. Bojtos, *2023-Szenzortechnika-(BMEGEMIBMSZ)-06-Optikai erzekelek-2*. BME MOGI Tanszék, 2023.
- [12] C.-C. Chan and H. H. Chen, „Improving the reliability of phase detection autofocus,” *Electronic Imaging*, vol. 30, no. 5, pp. 241–1–241–1, 2018.
- [13] Nikon, „Nikon | technology | predictive focus tracking system,” 11 2013.
- [14] Y. Liao, S. Song, R. Li, L.-F. Lu, and H. Xia, „The design of handheld stabilizer with follow focus function,” *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 569, pp. 032033–032033, 08 2019.
- [15] *Focus tracking for cinematography*, Association for Computing Machinery, 2012.

[16] SmallRig, „Wireless handwheel controller,” 2024.

[17] DJI, „Dji focus pro - feel the focus,” 2024.