

DIPLOMAMUNKA

Jójárt Péter

2009

SZEGEDI TUDOMÁNYEGYETEM
Természettudományi és Informatikai Kar
Optikai és Kvantumelektronikai Tanszék
Fizikus szak

DIPLOMAMUNKA

**Lézernyalábok irányának stabilizálása
és alkalmazásai**

Jó járt Péter

Témavezetők:

Dr. Osvay Károly, Görbe Mihály

2009

Tartalmi összefoglaló

A Nd:YAG lézer frekvenciakétszerezett fénynyalábját a SZTE Optikai és Kvantumelektronikai Tanszékén található TeWaTi erősített lézerrendszer két erősítőfokozatának meghajtására használják.

Az erősítőrendszer a felhasznált fizikai jelenségek természete (pl. az ún. nemkollineáris optikai parametrikus erősítés nagyon erős szögérzékenysége) és a nagy (többször tíz méteres) optikai úthosszak miatt nagyon pontosan (néhány tized milliradiánnál pontosabban) beállított bemenő nyalábirányt igényel. Ezt a jelenleg rendelkezésre álló lézer nem képes biztosítani, mert annak gyártója csak fél milliradiányi nyalábirány-stabilitást garantál.

Célul tűztem ki ezért egy aktív nyalábirány-stabilizáló-rendszer hardveres és szoftveres kiépítését és annak az eredeti lézer-vezérlőprogramba integrálását. Az elkészült megoldásban a számítógép egy kamera segítségével figyelemmel kíséri az optikailag leképezett nyalábirányt, és az elvárttól való túlzott eltérés esetén egy motorizált tükörrel beavatkozik, kijavítja az elállítódott optikai utat.

A vezérlőprogramot arra is fel kell készíteni, hogy a fényutakba épített kis szemafor-szerű optikai elemekkel gyorsan, biztonságosan és kényelmesen lehessen a lézersugár útját elzárni ill. megnyitni. A fényutak azonnali lezárására (vészleállítás) hardveres megoldást is be kell építeni.

Ritkán előfordulhat áramszünet a laboratóriumban. Korábban egy ilyen rendkívüli esemény bekövetkeztekor elveszett minden beállítás, több órányi többletmunkát okozva a kutatóknak. Emiatt szükségessé vált a lézerrendszert vezérlő program módosítása oly módon, hogy a beállítások minden változtatáskor automatikusan naplózásra kerüljenek a számítógép merevlemezén, és így a beállítások visszakövethetőek legyenek.

Dolgozatomban ismertetem az iránystabilizált lézernyaláb egy konkrét alkalmazását, amikor az Nd:YAG lézer negyedik felharmonikusával végeztek anyagmegmunkálási kísérleteket. Az elrendezésben kétszeres térszűrést alkalmaztak a nagy homogenitású ultraibolya nyaláb előállításánál.

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	5
2. Előzmények	6
2.1. A TeWaTi lézerrendszer	6
2.2. Nyalábirány-ellenőrzés a távoli zóna figyelésével	8
2.3. A mérőeszközök lingua franca-ja: a LabVIEW	9
3. Célkitűzések	11
3.1. Az alapvető célkitűzés	11
3.2. További kapcsolódó célkitűzések	11
4. A nyalábirány stabilizálása	12
4.1. Követelmények a programmal szemben	13
4.2. A programrész működtetése	13
4.3. A stabilizálás megoldásának elve	15
4.4. Hardveres problémák és megoldásuk	22
4.4.1. Forró pixelek	22
4.4.2. Az expozíció triggerelése	22
4.6. Az elért pontosság megbecslése	24
5. A lézerrendszeren végzett egyéb munkák	26
5.1. Fénymegszakító-vezérlés	26
5.1.1. Követelmények a programmal szemben	27
5.1.2. A programrész működtetése	28
5.1.3. A fénymegszakító-vezérlés megoldásának elve	28
5.1.4. A vészleállítás hardveres megoldása	29
5.2. Adatmentés és naplózás	30
5.2.1. Követelmények a programmal szemben	30
5.2.2. A programrész működése	30
5.2.3. A megoldás elve	30
6. Az irány-stabilizált lézernyaláb anyagtudományi alkalmazása	32
7. Összefoglalás	34
8. Nyilatkozat	35
9. Irodalomjegyzék	36
10. Köszönetnyilvánítás	37

1. Bevezetés

Az SZTE Optikai és Kvantumelektronikai Tanszékén felépült TeWaTi rendszer (terawatt csúcsteljesítményű titán-zafir lézerrendszer) által kibocsátott 25 fs ($25 \cdot 10^{-15}$ s) időtartamú, terawatt (10^{12} W) csúcsteljesítményű lézerimpulzusok fókuszált intenzitása megközelíti a 10^{17} W/cm² értéket, időbeli tisztasága (kontrasztja) meghaladja a 10^9 szintet [1,2]. A TeWaTi laboratóriumában található impulzusüzemű Nd:YAG lézert alapvetően két célra használjuk. A frekvenciakétszerezett, 532 nm-es (zöld) fénynyalábjával egyrészt közvetlenül a terawatt csúcsteljesítményű TeWaTi lézerrendszer két erősítőfokozatát hajtjuk meg. Másrészt egy további frekvenciaátalakítás és kétszeres térszűrés után 266 nm-en hozunk létre nagy térbeli homogenitású ultraibolya impulzusokat, melyekkel lézeres anyagmegmunkálási kísérleteket végzünk.

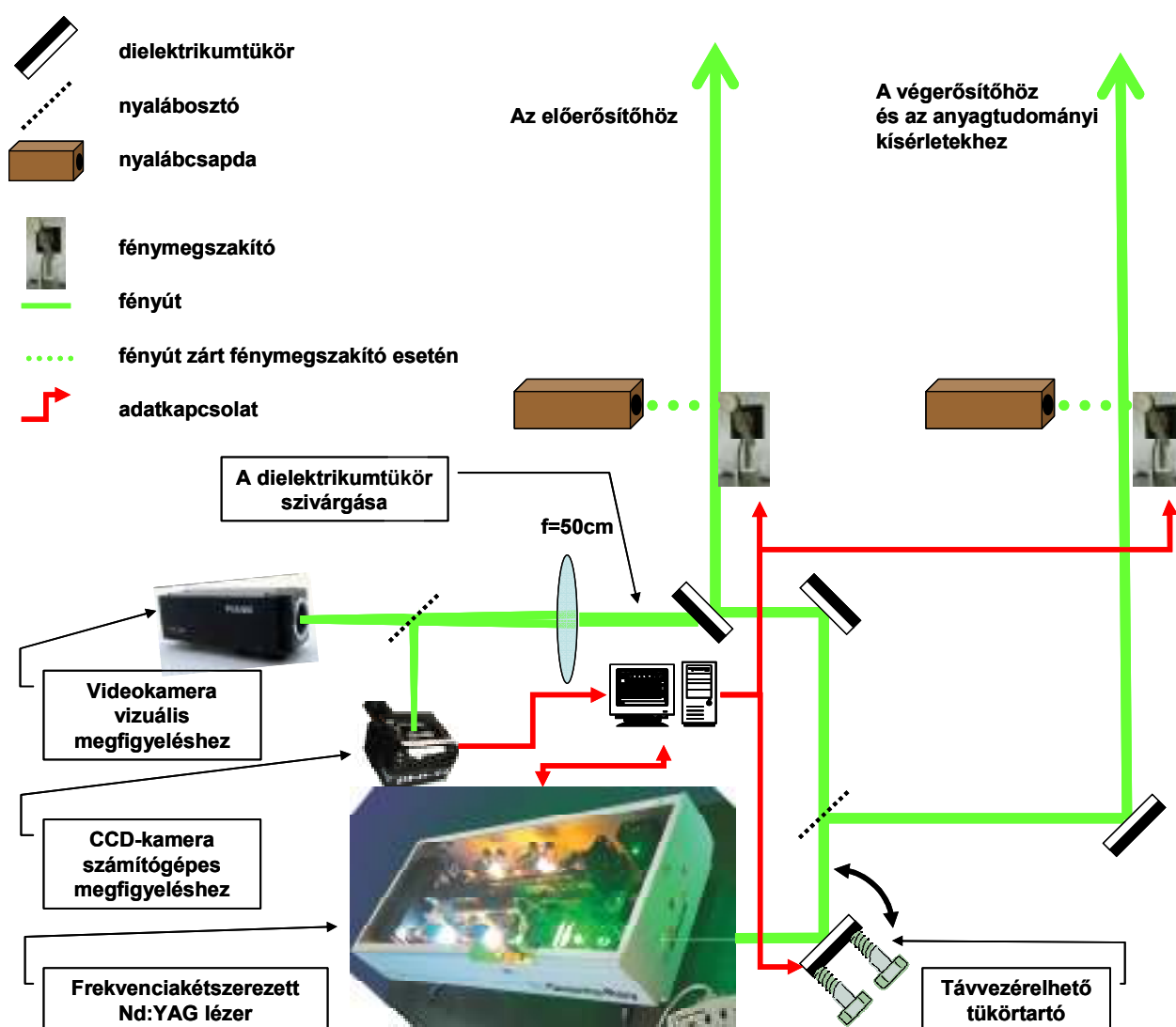
A diplomamunka témája a TeWaTi lézerrendszer pumpa-lézerének és lézeroszcillátorának iránystabilitását biztosító számítógépes program elkészítése, és egyéb kapcsolódó munkák elvégzése. A vezérlőprogramot a fizikus-társadalomban közkedvelt, és a laboreszköz-gyártók által is szabványnak tekintett LabVIEW fejlesztőkörnyezet grafikus programozási nyelvén, ún. virtuális műszer formájában készítettem el.

Végül bemutatom az aktív nyalábirány stabilizálás egy konkrét alkalmazását. A kísérlethez, melyben kvarc szubsztrátok hátoldalát lézeres maratásnak tettük ki, az Nd:YAG lézer negyedik felharmonikusát használtuk fel. A nagy térbeli homogenitású ultraibolya lézernyaláb előállítására kétszeres térszűrést végeztünk, melynek elengedhetetlen kelléke volt a megvalósított és a jelen dolgozatban leírt aktív nyalábstabilizálási rendszer.

2. Előzmények

2.1. A TeWaTi lézerrendszer

A lézerrendszer 800 nm központi hullámhosszú, 60 nm sávszélességű magimpulzusait egy titán-zafir oszcillátor hozza létre [1,2]. Ezeket a 16 fs hosszúságú lézerimpulzusokat egy optikai rácskból álló impulzusnyújtóban 250 ps időtartamúra nyújtjuk, hogy csúcsteljesítményüket lecsökkentsük, és így az erősítőrendszer elemeit megóvjuk az optikai roncsolódástól.



1. ábra A TeWaTi lézerrendszer pumpálásának és vezérlésének egyszerűsített vázlatja

A nemkollineáris optikai parametrikus erősítésen (NOPA) alapuló első erősítő fokozatot egy Nd:YAG lézerrel 10 Hz ismétlési frekvencián pumpáljuk (1. ábra), így $5 \cdot 10^4$ -szeres erősítést érünk el.

Ezután az impulzusokat a Nd:YAG lézer energiájának nagyobb részével pumpált titán-zafír kristályban 70 mJ-ra erősítjük fel. A megerősített impulzusokat végül egy ugyancsak rácsos impulzus-kompresszorral összenomjuk, hosszuk így 25 fs lesz, energiájuk közel 30 mJ marad.

Az Nd:YAG lézert önállóan is alkalmazzuk úgy, hogy egy további frekvenciakétszerezés után anyagtudományi kísérletekhez ultraibolya fényt (a negyedik felharmonikust, 266 nm) állítunk elő [3,4,7].

A lézerrendszer együttes, illetve az Nd:YAG lézer önálló, tudományos célú működtetéséhez elengedhetetlenül szükséges a lézer(ek) beállítási paramétereinek pontos és reprodukálható beállítása. Ebbe a mindennapi gyakorlatban a következő két szakaszban ismertetett lépések is beletartoznak.

2.1.1. A nyalábirány ellenőrzése

A TeWaTi lézerrendszerben a pumpáló fénynyaláb irányát dielektrikumtükrön átszivárgó fény CCD-kamerára való leképezésével (l. 1. ábra) ellenőrzik.

A nyalábirány elállítódása esetén a korrigálás közvetlenül a lézer kimeneti nyílásánál elhelyezett tükör megdöntésével lehetséges. A tükör üzemkezdeti beállítása, és rendszeres utánállítása korábban kézi művelet volt. Ez nem kellően folyamatos, mert a kezelők nem figyelhetik egész üzemidőben a képernyőn a nyalábirányt, és nem is biztonságos, mert a kísérletező személynek kényelmetlen testhelyzetben, a kezét a lézersugártól néhány centiméterre tartva kell kezelnie a tükörtartó csavarjait, és egy óvatlan mozdulattal könnyen a nyalábra nyúlhat. A pumpáló lézer 10 ns alatt 300 mJ energiát sugároz ki, ami együttesen olyan teljesítményt (30 MW) jelent, aminek akár a szórt része is nemkívánatos szem- és bőrkárosodást idézhet elő.

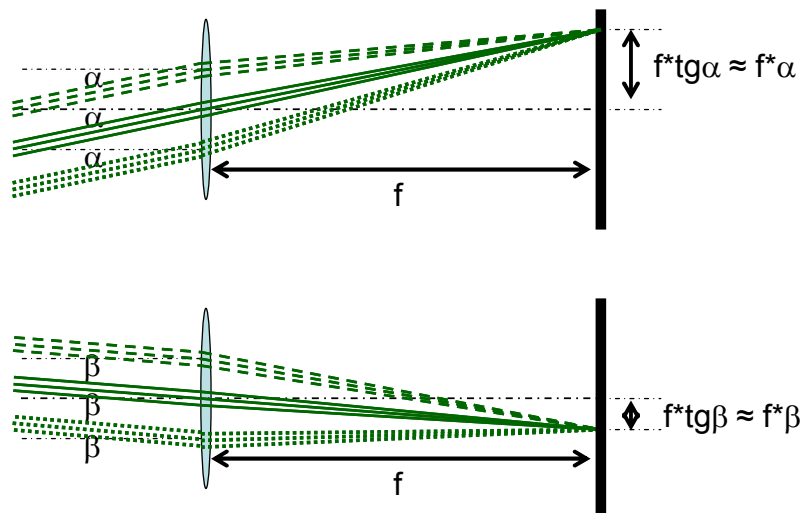
2.1.2. A fényutak nyitása-zárása

Alapvető elvárás, hogy a lézerrendszer főbb fényútjait könnyen és gyorsan el lehessen zárni ill. szabaddá lehessen tenni. Ezt korábban nyalábcspadák (többnyire jó fényelnyelő képességgel rendelkező, nagy hőkapacitású üreges fémtömbök) kézi behelyezésével és eltávolításával oldották meg. Ez a módszer nem volt se könnyű, se gyors (gyakran a kísérlet helyétől méterekre levő nyalábcspadákat kellett mozgatni), se biztonságos.

2.2. Nyalábirány-ellenőrzés a távoli zóna figyelésével

Ha egy kollimált fénynyaláb útjába vékony lencsét, a lencse fókusz síkjába pedig ernyőt helyezünk, akkor a fókuszált fényfolt helye a paraxiális optika szerint csak a bemenő fénysugár irányától függ. Amint az 2. ábrán látható, a különböző térbeli pozíciójú, de azonos irányú (folytonos, szaggatott ill. pontozott vonalakkal jelölt) fénysugarak az ernyő ugyanazon pontján találkoznak: ott, ahol a megadott irányú és a lencse közepén áthaladó fénynyaláb metszi az ernyőt. A különböző irányú fénysugarak azonban más és más helyekre képeződnek le: az 2. ábra alsó és felső részén látható kétféle irányú fénysugarak az ernyő két különböző pontján fókuszálódnak.

Ezt a jelenséget gyakran használják ki összetett optikai rendszerekben a nyaláb helyes irányának ellenőrzésére: az ernyőn megjelölt ponton tartják a fénysugár fókuszált képét. Gyakori az is, hogy ernyő helyett egy kamera chipjét használják és a megjelenítő képernyőn bejelölt referenciahelyen tartják a foltot.



2. ábra A nyalábirány és a fókuszált fényfolt pozíciójának összefüggése

A módszerrel elérhető pontosságot a detektor mérete (kamera esetén a pixelméret, szem esetén a csapok és pálcikák nagysága) a lefókuszált lézernyaláb átmérője és az objektív fókusz távolsága együttesen határozza meg. Ideális esetben a fénynyaláb fókuszfoltja *pontosan egy* pixelt világít ki. Kamerák esetén egyetlen pixel gerjesztése a gyakorlatban nehezen kivitelezhető, mivel a pixelek nem kör alakúak, ráadásul elektronikusan is kölcsönhatásban állnak egymással („áthallás” van közöttük). A paraxiális optika szerint a lencse fókusz távolságának növelésével egyenes arányban nőne a pontosság, mert a helyes iránytól adott szögben eltérő nyaláb nagyobb távolságra

lefókuszálva messzebb kerül az ernyőn (vagy a kamera chipjén) attól a helytől, ahová a helyes irányú nyaláb fókuszálna. Így kisebb eltéréseket is lehetne észlelni, de a valóságban (a diffrakció miatt) ilyenkor a folt mérete is növekszik, ami a pontosságot csökkenti. Ezért a pixelméret és fókusz távolság közötti ésszerű kompromisszumot kell megtalálni.

2.3. *A mérőeszközök lingua franca-ja: a LabVIEW*

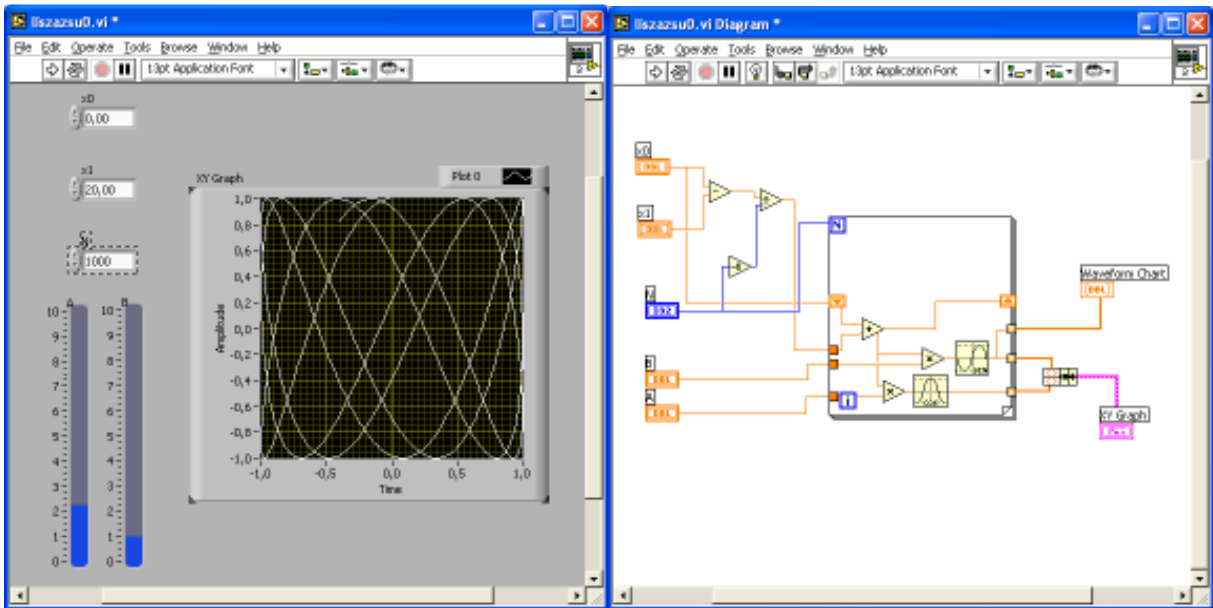
A LabVIEW programcsomagot PC bázisú műszerkészítésre fejlesztették ki. Grafikus programozású nyelv, virtuális műszerek fejlesztésére használják. Ez utóbbiakat a felhasználó készíti el az igényeinek megfelelően.

A LabVIEW egyben egy ipari, szabványos, nyitott architektúra is, amely nagy mennyiségű számítási művelet elvégzését, és ezek eredményeinek megjelenítését és tárolását teszi lehetővé. Adatgyűjtő kártyák, párhuzamos GPIB és VXI csatoló kártyák illesztésével a nyitott és szabványos buszhoz biztosíthatóak a műszer készítésének feltételei. A LabVIEW nagysebességű időkritikus alkalmazások fejlesztését is lehetővé teszi.

Segítségével könnyen és gyorsan kommunikálhatunk digitális eszközökkel. A legtöbb laborban használt lézervezérlőhöz, műszerhez mellékelnek LabVIEW-ban készült programot. Ezeket alprogramként újra felhasználhatjuk, továbbfejleszhetjük.

Egy LabVIEW környezetben írt program neve virtual instrument (VI), azaz virtuális műszer. Fő részei az előlap panel, a diagram panel (3. ábra) és az ikon (konnektor).

- 1) Az előlap panelen találhatóak a beállító és megjelenítő elemek, ezek segítségével kommunikál a felhasználó és a műszer. Ide az elképzeléseink szerinti vezérlőket (gombokat, számmezőket, szövegmezőket, csúszkákat), kijelzőket, diagramokat, grafikonokat helyezhetjük el az átláthatóság és a könnyebb kezelhetőség érdekében.
- 2) A G nyelv segítségével építhetjük fel a blokkdiagramot, ez az elkészített program „forrásnyelvi leírása”.



3. ábra Egy egyszerű LabVIEW-program előlapja és blokkdiagramja

- 3) A konnektor segítségével a VI-ból subVI-t (azaz alprogramot) hozhatunk létre. Így programunk szubrutinként vagy függvényként meghívható más programok számára is. Nincs korlát a szubrutinok kölcsönös hívásának mélységére vonatkozóan. A végrehajtás sorrendjét az adatáramlás szabja meg. Minden adatnak van forrása és fogadója. Egy adatnak egyetlen forrása van, de több fogadója lehet.

A diagram bármely művelete/folyamata csak akkor hajtódik végre, ha minden bemenő adata rendelkezésre áll. Ha a diagram valamely művelete számára minden bemenő adat rendelkezésre áll, akkor a művelet mindenképpen végrehajtásra kerül. Egy művelet minden kimenő adata egyszerre, a művelet befejezése után áll rendelkezésre.

A LabVIEW-nak négy alapvető struktúrája van:

- „While Loop”: feltételtől függő számú (hátultesztelős) ciklust végző utasítás.
- „For Loop”: véges számú ciklust végző utasítás.
- „Case structure”: feltételes elágazási struktúra.
- „Sequence structure”: sorrendi végrehajtás-struktúra.

A LabVIEW-ban létrehozhatunk tömböket is: ez olyan adatcsoport, melynek minden eleme azonos típusú. A tömb lehet egy- vagy több dimenziós. Ez megkönnyíti azoknak az algoritmusoknak a programozását, amelyekben például mátrixműveleteket kell végezni [6].

3. Célkitűzések

3.1. Az alapvető célkitűzés

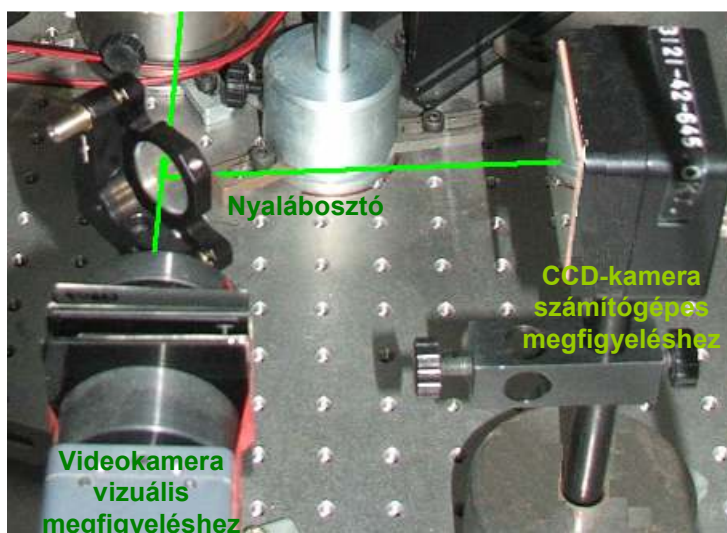
Célul tűzöm ki egy impulzusüzemű, nagy intenzitású lézernyaláb irányának nagy pontosságú aktív stabilizálását, hogy ezzel kiváltsam a balesetveszélyes és nem kellően folyamatos manuális beállítást.

3.2. További kapcsolódó célkitűzések

- Számítógép vezérelt fénymegszakítók beépítése a TeWaTi lézerrendszerbe, melyekkel a fényutakat gyorsan és balesetmentesen lehet nyitni és zárni, valamint többlövéses, tipikusan anyagtudományi kísérleteknél a lézeres besugárzás dózisa pontosan beállítható.
- Egy hardveres vészleállító megoldás kidolgozása, mely az összes fényutat azonnal lezárja, ha a lézerrendszer egy pontján diszfunkcionalitás tapasztalható.
- A lézerrendszer beállításainak időpont és esemény szerinti elektronikus naplózásának létrehozása. A beállítások így egyrészt nyomonkövethetőek, másrészt (egy esetleges áramszünet vagy számítógép lefagyás után) a legutolsó beállítások ismeretében könnyebb a visszaállítás.

4. A nyalábirány stabilizálása

A munka során az 1. fejezetben ismertetett, korábban vizuális megfigyeléssel és kézi beállítással működtetett nyalábirány-ellenőrző és -helyesbítő eljárást automatizáltam.



4. ábra Az EDC-1000HR CCD-kamera (jobbaldalt) és a Pulnix videokamera (alul)

A nyaláb helyzetének monitoron való közvetlen megfigyelésére a továbbiakban is szükség van, ezért az arra szolgáló kamerát meghagyva (4. ábra) egy nyalábosztóval kettéosztottam a lefókuszált nyalábot. A második fénypont megfigyelésére számítógéppel kiolvasható CCD-kamerát állítottam be (gyártó: Electrim Corp. Típus: EDC-1000HR, térbeli felbontása: $753 \text{ pixel} \times 244 \text{ pixel} = 8,66 \text{ mm} \times 6,59 \text{ mm}$, színmélysége: 8 bit, azaz 256 szürkeségi szint).

A korrigálásra szolgáló hagyományos tükörtartót piezoelektromos úton mozgatható és számítógéppel vezérelhető típusra (gyártó: NewFocus típus: Picomotor) cseréltem. A kézi beállítás lehetősége továbbra is megvan, az erre szolgáló gombok megfigyelhetők az 5. ábrán.

Az ezután következő munka alapvetően a kamera és a motorizált tükörtartó közötti megfelelő mértékű negatív visszacsatolás létrehozására irányult.



5. ábra New Focus Picomotorral felszerelt tükörtartó az Nd:YAG lézer kimeneténél

4.1. *Követelmények a programmal szemben*

- A stabilizálás aktív állapotában abban az irányban maradjon a nyaláb, ahová előzőleg a felhasználó beállította. Ez az irány legyen elmenthető, és be lehessen tölteni a program következő indításakor.
- Ne okozhasson rendellenes működést (például a tükör rendezetlen mozgását), ha a lézerfolt „lemegy” a képről, vagy valami kitakarja a kamerát.
- A felhasználó se tudjon hibás beállításokkal rendellenes működést okozni. (Felhasználóbarát és viszonylag egyszerűen kezelhető legyen; ne vegye figyelembe a megadott adatokat, ha azok hibásak.)
- A lézerfolt pozícióját a képen minél nagyobb pontossággal kell megállapítani, hogy ezáltal a nyalábirány is minél pontosabb legyen, amivel megnöveljem a laborban végzett mérések reprodukálhatóságát.
- Manuálisan is lehessen vezérelni a nyalábirányt a programon keresztül.
- Mivel a lézer impulzusüzemű, ezért a képbeolvasást a lézerrendszer triggerjeléhez kell szinkronizálni.
- Az optikai elrendezés megváltoztatása (pl. másik lencse, kamera, stb) esetén önmaga állapítsa meg a negatív visszacsatolás szükséges mértékét. A visszacsatolás iránya állítható legyen. (CCD chip kiolvasási iránya kameránként más és más lehet)

4.2. *A programrész működtetése*

A nyalábirány-vezérlő programrész az előlap „Pump beam direction control” címkéjű fülén érhető el. Itt egy legördülő menün választható ki az, hogy a nyalábirányt a

program gombjaival szeretnénk-e beállítani („Manual” menüpont, ez az alapértelmezett), vagy legyen aktív a nyalábstabilizálás („Stabilization” menüpont). Az utóbbi esetben háromféleképpen lehet meghatározni, hogy milyen nyalábirányt tekintsen helyesnek a program:



6. ábra Nyalábstabilizáló programrész előlapja



7. ábra A tükörtartó kézi vezérlésének előlapja

- A pillanatnyi nyalábirány (amit az előző tíz, a kamera által látott pozíció átlagaként értelmeznek) tartása: „Average” gomb (6. ábra).
- Korábban fájlba mentett, és újra betöltött irány tartása: „From file” gomb.
- Az előlap „Manual target setting” címkéjű mezőibe beírt koordináták tartása: „Manual set” gomb.

A kézi vezérlés paneljén a tükörtartó négy megdöntési irányának megfelelően négy nyomógomb található (7. ábra), és egy szövegmezőben meg lehet adni, hogy hányat lépjenek a motorok egy gombnyomásra ezekbe az irányokba. Gombnyomás után a lépésszám és a döntési irány közvetlenül a motorvezérlő alprogramnak adódik át, a tükörtartó állításának folyamatát pedig egy ellenőrzőlámpa jelzi a gombok alatt.

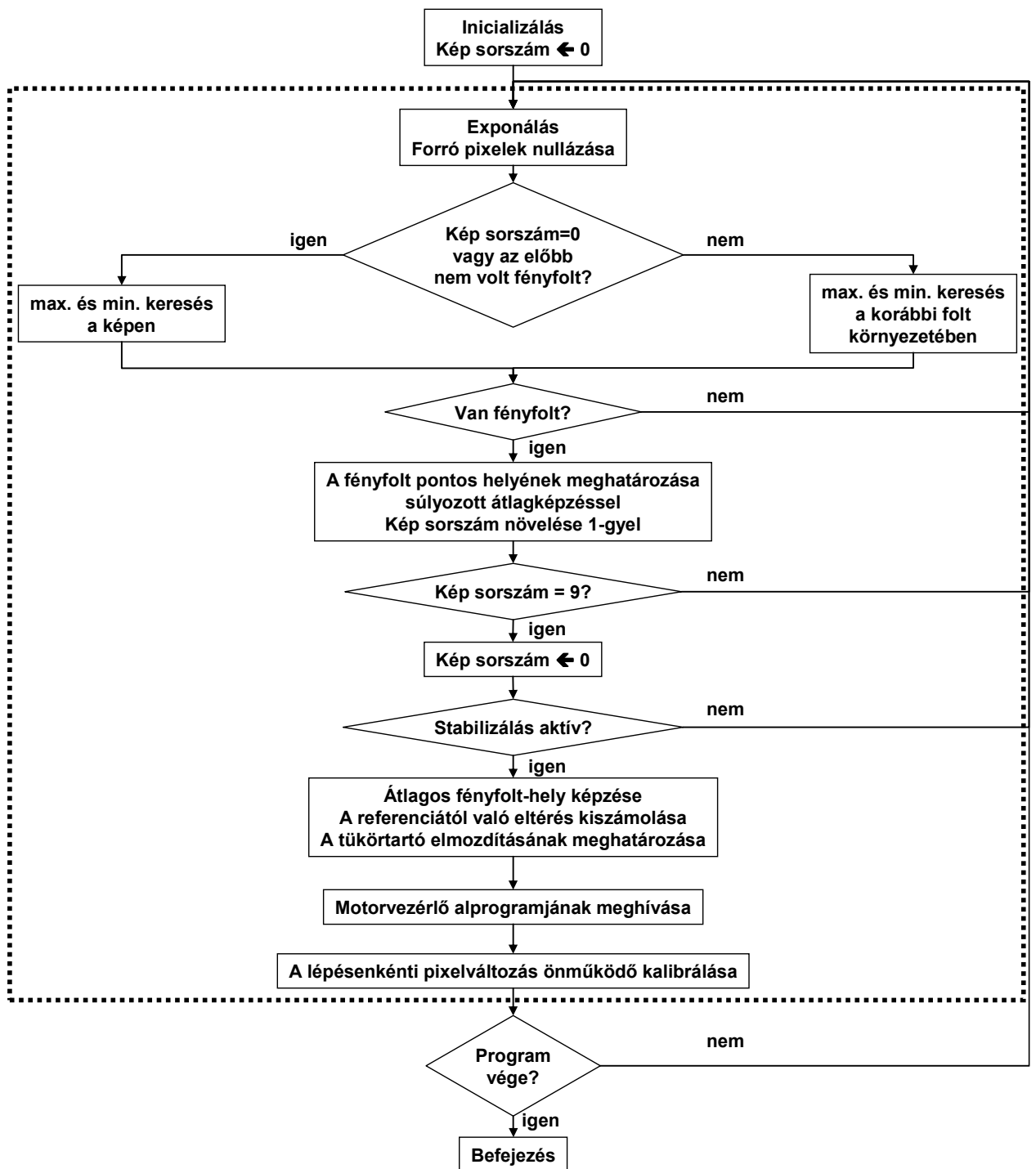
A kézi tükörállítások és a stabilizálási üzemmódban a betöltött pozíciók naplózásra kerülnek.

4.3. A stabilizálás megoldásának elve

A számítógépes algoritmus számítja ki a kamera és a motorizált tükörtartó közötti megfelelő mértékű negatív visszacsatolást. Alapvető lépései:

1. A kamera többszöri kiolvasása, a képeken a fényfolt megkeresése, és a folt-pozíciók átlagának kiszámítása;
2. A referencia és az átlagos hely különbségének megállapítása;
3. A különbségből a referenciára való visszaálláshoz szükséges tükörtartó-mozgatás kiszámítása;
4. A tükörtartó elmozdítása a kiszámolt mértékben;
5. Vissza az 1. lépésre.

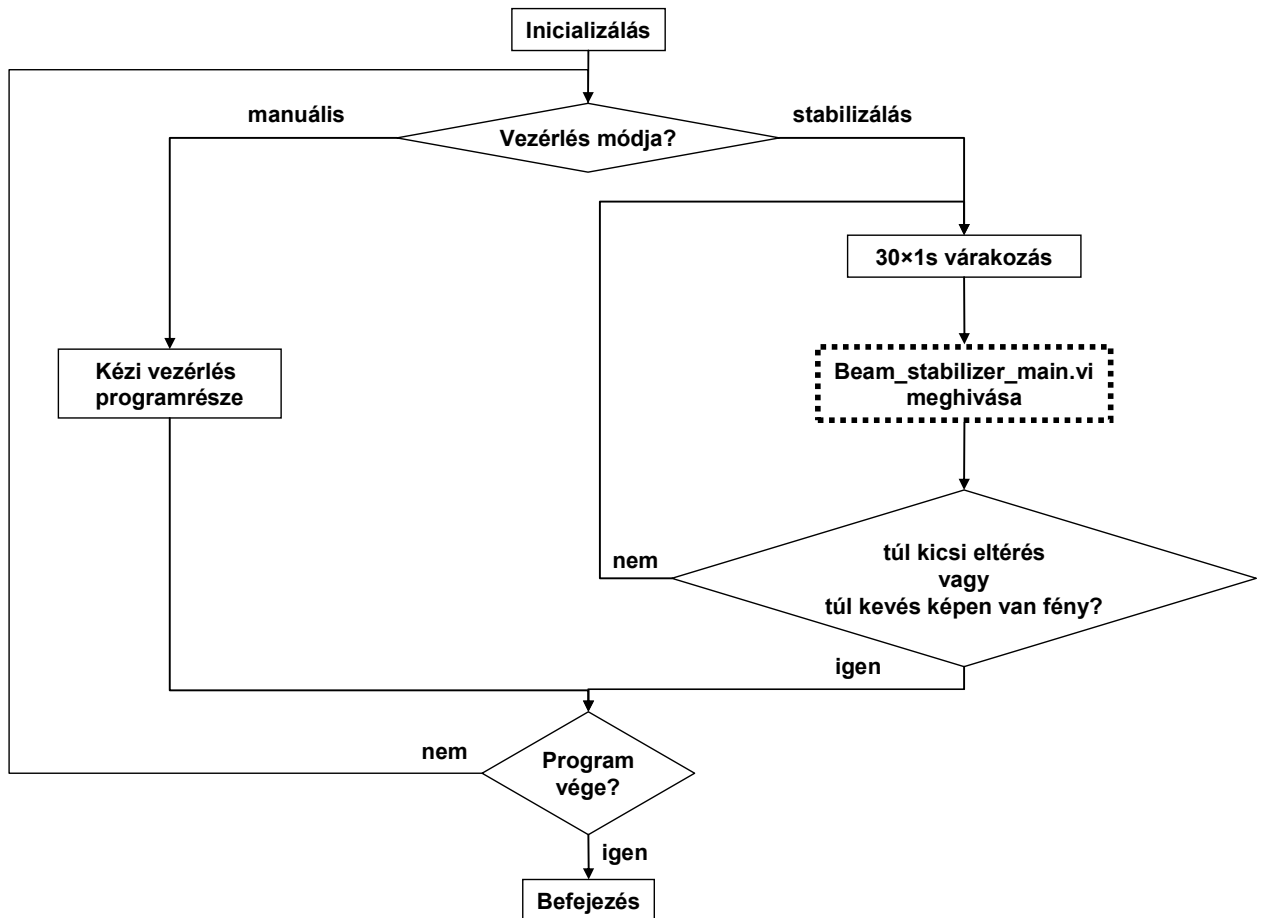
Az algoritmus alapötlete a 8. ábrán látható. A szaggatott vonallal bekeretezett részt a jobb áttekinthetőség, és a következőkben ismertetett technikai nehézségek megoldása érdekében alprogramként (a `beam_stabilizer_main.vi` fájlból) hívom meg.



8. ábra A nyalábstabilizálás blokk-sémája

Az EDC-1000HR kamera kiolvasása hosszú ideig tartó művelet (több mint 300 ms), mely közben a többi, párhuzamosan futó programrész is nagyon lelassul. Lehetőséget ad azonban a számítógép terhelésének csökkentésére és a program többi részének jelentős felgyorsítására az, hogy a pumpáló Nd:YAG lézer nyalábiránya nem változik gyorsan. Ezért a stabilizáló programrésznek elegendő hosszabb időközönként (tapasztalat szerint megfelel a 30 másodperces időköz) ellenőriznie az irányt, és a tükörtartón keresztül csak

akkor beavatkozni, ha jelentős eltérést tapasztal a beállított pozíciótól. Ez a fenti (17. oldalon ismertetett) lépéssorozat 4. és 5. lépései közé beillesztett 30 másodperces várakozást jelent.



9. ábra A nyalábstabilizáló programrész blokkdiagramja

Ennek megvalósítása a 9. ábrán látható: a fentiekben ismertetett alap-algoritmusnak a 8. ábrán szaggatott vonallal bekeretezett részét egy bővebb ciklusból hívom meg. A kézi vezérlő részt is a főprogram szintjén volt a legegyszerűbb megvalósítani egy feltételes elágazás másik eseteként. Az algoritmusnak ez utóbbi kiegészítése szintén a 9. ábra blokk-sémáján látható.

4.3.1. Az algoritmus részletes ismertetése

Inicializáló rész

Szöveges figyelmeztetést kapunk, ha a számítógép nem érzékeli a léptetőmotort (nincs bekapcsolva vagy megszakadt a kapcsolat). A szöveges figyelmeztetés belekerül a program naplójába is; a motorvezérlő alprogram sikertelensége a főprogram futása során is generálja a figyelmeztetést. A kamera forró pixeleinek helye táblázatos fájlból egy tömbbe kerül. Habár az inicializáló részbe szokták tenni a port-megnyitásokat, stabilabb megoldás,

ha a motorvezérléshez a port megnyitása, majd lezárása nem a főprogram szintjére kerül, hanem közvetlenül az alprogramba, mert ellenkező esetben a program esetleges hibás leállása esetén a port nyitva maradhatna, és a program újraindítása előtt a számítógépet is újra kellene indítani.

Expozíció

A kamerát exponáló függvény (`camera_img.vi` és `camera_variables.vi`) eredeti változata az EDC-1000HR kamera „`hrcam32.dll`” függvénytára köré épült, melyben összesen két függvény van: az egyik beállítja a gain-t és a bias-t, a másik megadott időtartamú exponálást hajt végre, és az elkészült képet beolvassa. A `camera_variables.vi` néhány fontos számadatot tartalmaz (képméret, port, egyébek...).

Az `camera_img.vi`-t módosítottam azzal a céllal, hogy a hardveresen nem triggerelhető kamerát lehessen szoftveresen triggerelni. Ezt úgy valósítottam meg, hogy egy, a 4.4.2 szakaszban ismertetett „triggerjel” változó IGAZ értékére várakozó ciklust tettem közvetlenül az exponálást elvégző DLL-hívás elé. Ha nincs jel, akkor is le kell állnia a ciklusnak 2000 ismétlődés után (ez gyakorlatilag fél másodperc). Ha a jel hiánya miatt állt le a ciklus, akkor nem fut le az exponálás lassú külső függvénye.

Az exponálás feltétele az is, hogy más programrészek nem tiltották le kamerát. A program más, időkritikus részei (pl. a fénymegszakító adott idejű nyitva tartása) ugyanis várakoztathatják a kamerát (egy globális Boole-változóba írva, hogy engedélyezik-e a kamera exponálását vagy nem). Ennek oka: ha egyszer a kamerát exponáló függvény meghívódik, fél másodpercre nagyon lelassul a program többi része.

Ha nincs tiltva a kamera, akkor a következő eljárást követem: mivel a számítógép és a kamera nem képes azonnal reagálni a triggerjelre, de közelítőleg tudjuk, hogy a következő impulzust a lézer 100 ms múlva fogja kiadni, egy előzőleg kitapasztalt késleltetés letelte után hívom meg a kamera DLL-jéből az exponáló függvényt. A módszer így sem teljesen pontos, ± 20 ms szórása van.

A fényfolt pontos helyének meghatározása

- A program megkeresési a képen a maximális és a minimális intenzitású pixelt. Ha intenzitásuk különbsége nem éri el a 100 szürkeségi szintet (a 255-ből), akkor ezt úgy értelmezi, hogy nincs lézerfolt a képen (mert az általában 200 fölötti intenzitáskülönbséget okoz).
- A maximumhely körül egy 10×10 pixel méretű négyzetben fényerővel súlyozottan átlagolja a program a képpontok (x,y) koordinátáit. Ezt a koordinátapárt egy tömbben tárolja. A súlyozott átlagból kapott aktuális maximumhelyet megjelöli az

előlapon megjelenített képen a kurzorokkal, így könnyebben ellenőrizhető a program működése (ez a fejlesztést is jelentősen megkönnyítette).

Ezek a lépések tízszer megisméltődnek úgy, hogy első alkalommal még az egész képen fut le a maximum keresése, a többi esetben már csak az előzőleg megtalált maximumhely körül felvett 20×20 pixeles négyzetben. A nem elegendő fényt tartalmazó képek maximumhelyei nem kerülnek tárolásra és feldolgozásra. A néha előforduló hibás CCD-kiolvasás miatt látszólag félreugró lézerfolt sem okoz gondot, mert a minimum és maximum különbségét is csak ebben a 20×20 pixeles négyzetben vizsgálja a többi képen. Ha ebben nincs fényfolt, akkor a következő végrehajtáskor ismét az egész képet dolgozza fel. Erre azért van szükség, mert ha nem a CCD kiolvasása volt a hibás, hanem tényleg megváltozott a nyalábirány, így akkor is meg lehet találni a lézerfoltot.

- A 10 folt pozícióinak átlaga lesz a lézerfolt pontos helye.

Ezzel a kétféle, együtt alkalmazott átlagolással együttesen akkora pontosságot lehet elérni, hogy akár egy pixel méreténél kisebb eltérés is jól detektálható, és korrigálható (mivel a motor ilyen kicsit is tud lépni). Így az irány pontatlansága legfeljebb néhány mikroradián lehet.

Tartandó pozíció ellenőrzése

Az elkészült megoldás véd a felhasználó által megadott hibás adatokkal szemben: ha bármi úton nulla, netán negatív szám került a tartandó hely változójába, illetve ha a pozícióban valamely koordináta nagyobb, mint a CCD-kép mérete, akkor a program HAMISra állítja a „Hold Position” gomb változóját, és így a program későbbi működése során biztosan nem mozgatja le a képről a fényfoltot egy ilyen tévedés miatt. Egy ellenőrzőlámpa (a „Status” címkéjű) jelzi a felhasználó számára, ha a stabilizálás aktív állapotban van, ami csak helyes tartandó pozíció esetén lehetséges. Hibás adat esetén az ellenőrzőlámpa is elalszik.

A tükörtartó elmozdításának kiszámítása

- A motorvezérlő meghívása előtt az átlagos lézerfolt-hely és a tartandó hely különbségét képezem. Ez a fényfolt elvárt elmozdulás-vektora az aktuális helyről a tartandó helyre.
- A tükörtartó két léptetőmotorjának lépésszáma az elmozdulás komponenseinek és a motorokra jellemző *lépésenkénti pixelváltozás* szorzata lesz. A lépésenkénti pixelváltozás nem egyforma a két léptetőmotorra, sőt egy motor pozitív vagy negatív irányú lépéseire sem. Erről bővebben a 21. oldalon, „A lépésenkénti pixelváltozás önműködő kalibrálása” szakaszban fogok írni.

A motorvezérlő alprogram

Az Newport által a léptetőmotor-vezérlőhöz adott dinamikus függvénykönyvtár (DLL) rutinjainak meghívásával elforgatja a megadott sorszámú motort megadott számú lépéssel, majd kijelzi, hogy sikeres volt-e a forgatás.

A lépésenkénti pixelváltozás önműködő kalibrálása

A tükörtartó piezoelektromos léptetőmotorjai nem ugyanakkorát lépnek pozitív és negatív irányban, és a gyártó által adott specifikáció szerint 20%-os pontatlanságuk van egy irányon belül is. Ezért az igazán pontos lépésszám számításhoz nem elegendő egy mérésből meghatározni azt, hogy egy motor-lépés hány pixelnyi elmozdulást eredményez a kamera által érzékelt fényfolt helyzetében, hanem folyamatosan mérni kell, és a mérési adatokat átlagolni. Minél pontosabb értékekkel számol a program, annál hamarabb éri el a nyaláb a helyes irányt.

A program alapértelmezett működéséhez olyan lépésenkénti pixelváltozás értékek vannak megadva, amelyek közel optimálisak, és a program elfogadhatóan használható velük. Ezek az értékek eredetileg maguk is ebből a programrészből származnak. Ha változik az elrendezés valamely tulajdonsága (pl. az objektívlencse fókusztávolsága, vagy másfajta kamerát, tükörtartót használók), akkor ez a részprogram képes megállapítani a lépésenkénti pixelváltozás valódi átlagértékeit, melyek azután alapértelmezetté is tehetők.

A lépésenkénti pixelváltozást kalibráló programrész csak akkor hívódik meg, ha nincs motorhiba, és a stabilizálás aktív.

A program a kalibráció során folyamatosan gyűjti a következő adatokat:

1. előző pixelváltozás (mind X, mind Y irányban)
2. előző lépésszám (mind X, mind Y irányban)
3. korábban kiszámolt lépésenkénti pixelváltozások összege (mind X, mind Y külön a pozitív és a negatív irányban)
4. korábban kiszámolt lépésenkénti pixelváltozások darabszáma (mind X, mind Y külön a pozitív és a negatív irányban)
5. korábban kiszámolt lépésenkénti pixelváltozások átlaga (mind X, mind Y külön a pozitív és a negatív irányban)

Az összeg és a darabszám külön tárolása lehetőséget ad arra, hogy az átlagolást folyamatosan új értékekkel bővítsem. Ha az adott darabszámot növelem eggyel és az új értéket hozzáadom az összeghez, az átlag mindig az összeg/darabszám lesz. Az átlagértékeket azért tárolom kiszámolva, hogy azokat ne a felhasználás helyén kelljen külön kiszámolni. A kalibrációból származó értékek felhasználását biztonsági okokból

csak akkor engedélyezem, ha már minden irányban legalább 20 mérésből származik az átlag.

4.4. Hardveres problémák és megoldásuk

4.4.1. Forró pixelek

A nyalábirány-észlelésre használt kamera *forró pixelei* félrevezethetik az algoritmust (esetleg ezeket ismerné fel lézerfoltként). Ezen hibás pixelek felismerése és feljegyzése céljából alacsony zajú beállításokkal, alaposan lesötétített kamerával készítettem felvételeket. Amelyik pixel sötétben is világosat jelzett, azt forrónak, vagy legalábbis hibásnak tekintettem. Mivel még mindig lehetett egy kevés alapzaj a jó pixeleken is, így csak azokat a pixeleket jegyeztem fel fájlba, amelyeken a kamera által mért szürkeségi szint meghaladta a 25-öt a 256-os skálán. Ennek a kb. 10%-os értéknek a megválasztását az indokolta, hogy ez tapasztalat szerint magasabb, mint bármilyen zaj, így nem fogom a zajból eredő kicsiny, mindig változó helyen megjelenő szürkeséget hibás pixelnek venni. Ha pedig az érték nagyobb lenne, túl kevés forró pixelt tudnék csak kiküszöbölni.

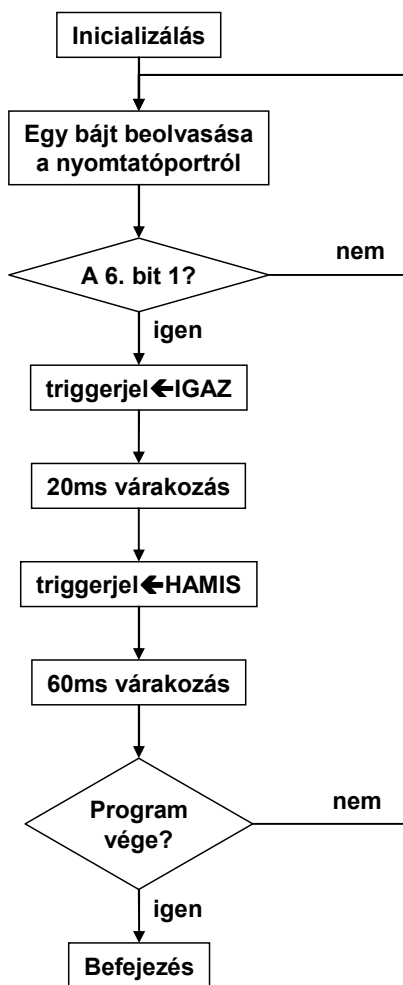
A forró pixelek helyének ismeretében a zavaró hatásuk könnyen kiküszöbölhető: a kamerából kiolvasott minden egyes képen szoftveresen le lehet sötétíteni őket úgy, hogy az eredményül kapott adattömbben még a képfeldolgozás előtt nullával írom felül a forró pixelek értékeit. Ezek után a lézerfolt megtalálását, mely maximumkereséssel történik, már nem zavarhatják meg.

4.4.2. Az expozíció triggerelése

A TeWaTi 10 Hz-es ismétlési frekvenciájú impulzus-lézerrendszer, vagyis az impulzusok viszonylag hosszú (100 ms időközönként) követik egymást. Ha 100 ms-nak választanám a kamera expozíciós idejét, akkor azon időtartam alatt biztosan érkezne lézerimpulzus a kamerára, de a háttérfény hosszú integrálása jelentősen lerontaná a jel-zaj viszonyt. Ezért rövidebb expozíciós időre van szükség, de meg kell oldani, hogy a rövidebb időtartam alatt is biztosan érkezzen fényimpulzus a detektorra. A kamera exponálását ezért az impulzusokhoz kell szinkronizálni, *triggerelni*.

Bár léteznek különleges, triggerelhető kamerák, sőt triggerelhető illesztőkártyák is, azonban számomra ilyenek nem álltak rendelkezésre: hardveresen nem triggerelhető kamerát kellett használnom.

A lézerrendszer részeinek időbeli szinkronizálására szolgáló egyik impulzusgenerátor (gyártó: Stanford Research Inc. típus: DG535) egyik kimenetével kellett összehangolnom a program futását, ezen belül a kamera exponálását. Ehhez azt használtam ki, hogy a nyomtatóport bizonyos érintkezőire érkező feszültséget a számítógép ki tudja olvasni. Ezek közül én a 12. tűhöz kötöttem a triggervezetékét, az egyik földelő-érintkezőhöz (a 24.-hez) pedig az impulzusgenerátor földjét. Ebben a kiépítésben a 0x379-es portról beolvasott bájtnak a 6. bitjének a 1 értéke utal a magas TTL bemenetre, a 0 érték pedig az alacsonyra.



10. ábra A triggerjel figyelésére szolgáló programrészlet blokk-sémája

A lézerrendszer vezérlőprogramjának része egy ciklus, amelyet csak a program végén szakad meg, ennek magjában a következő lépések különíthetők el (10. ábra):

Először megvárja a triggerjelet: addig olvassa a párhuzamos portról a bájtokat, amíg a 6. bit értéke magasnak nem bizonyul (vagy véget nem ér a program). Ekkor a „triggerjel” globális boole változót IGAZra állítja. Ebből az IGAZ értékből tudja a többi programrész kiolvasni, hogy a triggerjel megérkezett.

Második lépésben 20 ms-ig vár, utána HAMISra állítja a „triggerjel” változót, jelezvén a többi programrésznek, hogy a korábbi triggerjel már nem aktuális, meg kell várniuk a következőt.

Harmadik lépésben 60 ms várakozás után előlről kezdődik a triggerre várakozás a nyomtatóport folyamatos beolvasásával. A 60 ms-os várakozás azért hasznos, mert abban az időtartamban nem várható magas feszültség a triggervezetéken (az egész folyamat periódusideje a 10 Hz-es ismétlési frekvenciájából következően 100 ms), a port-olvasások biztosan eredménytelenek lennének; előnyösebb várakozni, mint a számítógép erőforrásait ezzel terhelni más programrészek rovására.

4.5. *A nyálábstabilizálás elért eredményei*

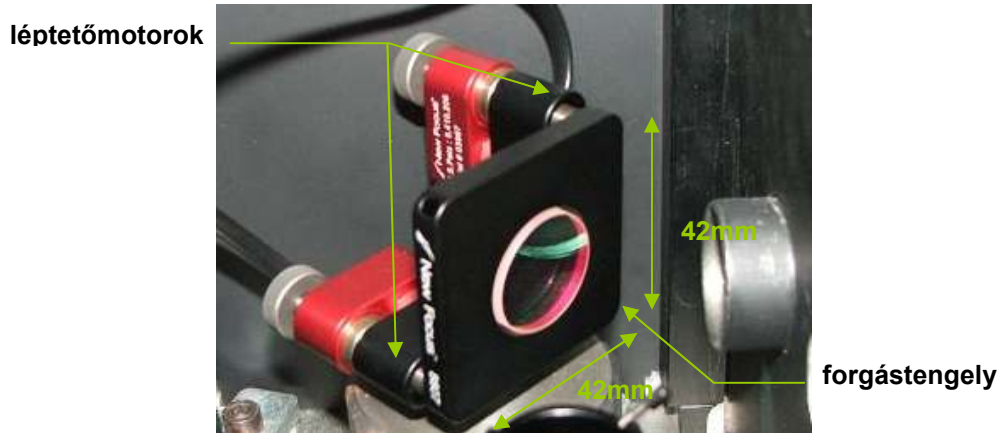
Eleget tettem a 4.1 szakaszban megfogalmazott követelményeknek. Ezen kívül a következő eredményeket is sikerült elérnem:

- Megfelelő átlagszámítások beépítésével a lézerfolt helyének meghatározási pontatlansága kevesebb, mint 1 pixel a kamerán.
- A program képes alkalmazkodni egy megváltozott elrendezéshez (pl. másik objektív-lencséhez) is a negatív visszacsatolás megfelelő mértékének önálló megállapítása révén.
- A léptetőmotor irányváltásból fakadó hiszterézisét valamint az irányfüggő lépési nagyságát korrigáltam.
- A kamera ún. forró pixelei okozta hiba illetve zaj kiszűrése.
- A ritkán előforduló hibás CCD-kiolvasást, mikor a kép teljesen más részén jelenik meg a lézerfolt, észlelem, és a hibás képet nem veszem figyelembe.

4.6. *Az elért pontosság megbecslése*

A léptetőmotor 30nm-es lépésfinomsága korlátot szab a tükör beállítási pontosságára (l. 11. ábra):

$$\Delta\phi_{\max,motor} = \frac{\text{lépésnagyság}}{\text{a motor távolsága a forgástengelytől}} = \frac{30nm}{42mm} \approx 0,8\mu rad .$$



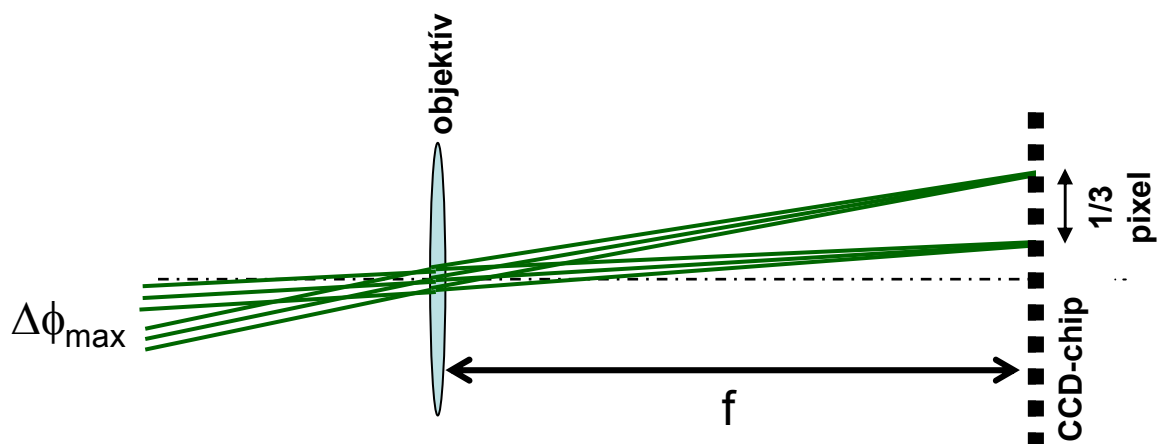
11. ábra A tükörtartó beállítási pontosságához

A fénysugár beállítási pontossága a tükör beállítási pontosságának kétszerese.

A CCD-kamera figyeli, hogy a fókuszált fényfolt pozíciója mennyire tér el a referenciahelytől. A fényfolt helyét a tapasztalat szerint kb. 1/3 pixel pontossággal tudom meghatározni, azaz ha a program 1/3 pixeles kiszámított eltérés esetén avatkozik be, még megbízható a stabilizáló algoritmus működése. Ez a 27 μ m-es pixelmérettel és a 0,5m-es objektív-kamera távolsággal (l. 12. ábra)

$$\Delta\phi_{\max} = \frac{a \text{ pozíciómeghatározás pontossága}}{\text{az objektív és a kamera távolsága}} = \frac{\frac{1}{3} \text{ pixel} \cdot 27 \frac{\mu\text{m}}{\text{pixel}}}{0,5\text{m}} \approx 18 \mu\text{rad}$$

szögbeállítási pontosságot jelent, amit — mint fentebb kiszámítottam — a léptetőmotor tud is teljesíteni.



12. ábra A nyalábirány beállítási pontosságához

5. A lézerrendszeren végzett egyéb munkák

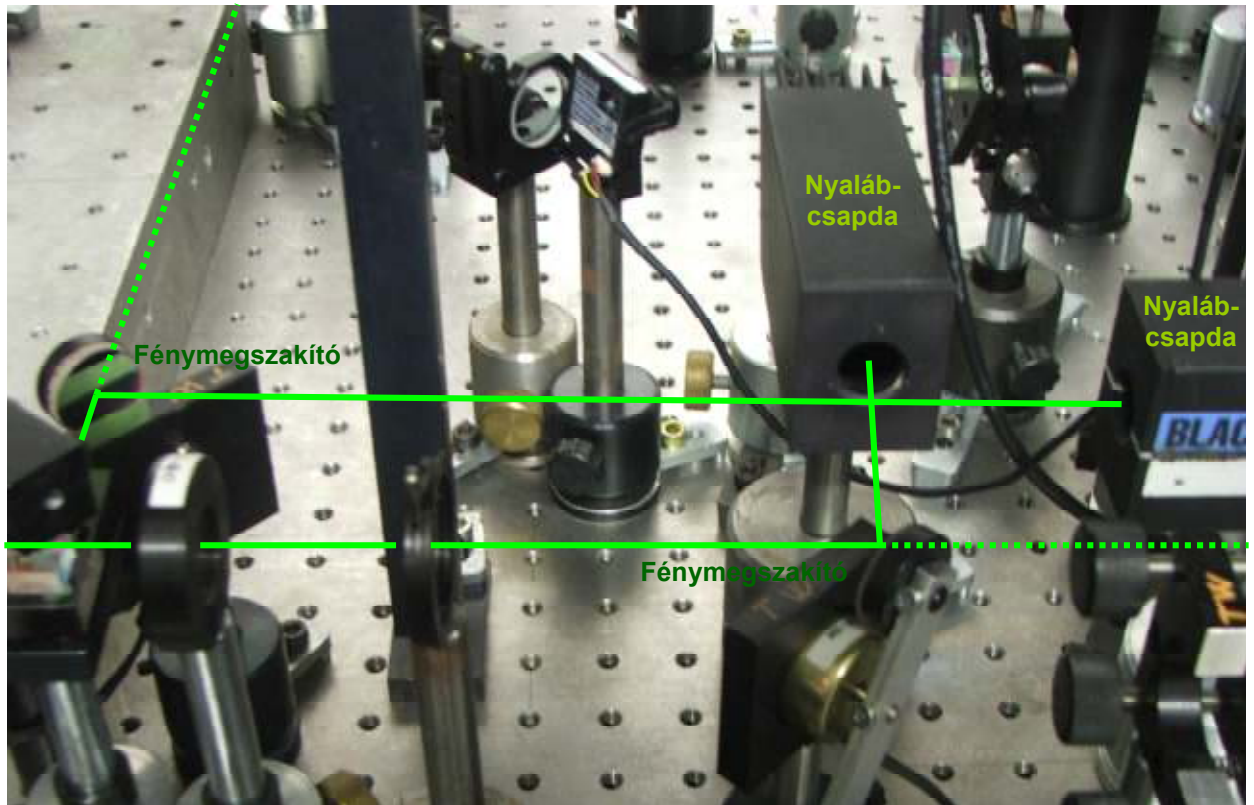
5.1. Fény megszakító-vezérlés

A fény megszakító tulajdonképpen egy motor, ami egy rudacsán lévő tükröt forgat (13. és 14. ábrák). A fény út elzárását ezzel úgy oldom meg, hogy zárt állásban a tükör a fényt egy nyalábcspdába továbbítja. Nyitott állapotban a motor a tükröt kiforgatja a fény útból.

Összesen négy fény megszakító került beépítésre a rendszerbe, ezek közül három a Nd:YAG lézer pumpáló fény nyalábját nyitja-zárja (ezek közül kettő látható az 1. egyszerűsített ábrán).



13. ábra Fény megszakító



14. ábra Fénymegszakítók és nyalábcsapdák beépítve

5.1.1. Követelmények a programmal szemben

A LabVIEW programnak a motorokat vezérlő mikrokontrollerrel kell kommunikálnia egy egyszerű soros porti protokollal.

- Az elvárás szerint ezeket a fénymegszakítókat lehet vezérelni a program előlapjával és a rendszerbe beépített botkormány tűzgombjával is.
- Botkormány-vezérlés esetén egy bizonyos, a felhasználó által kiválasztott fénymegszakítót lehet irányítani úgy, hogy az a bekapcsolás után egy előre beállított idő elteltével kikapcsoljon. Ezzel lehetővé válik, hogy a fénymegszakító pontosan meghatározott számú lézerpulzust engedjen át.
- Meg kell oldani, hogy a vezérlési mód megváltoztatása esetén a fénymegszakítók megőrizzék aktuális állapotukat. Hibás működés esetén a fénymegszakító ki- és bekapcsolhatna a vezérlési mód megváltoztatásakor, ez pedig tönkre teheti a mérést és az eszközöket is.
- Az előlapról működni kell mind a négy fénymegszakító ki- és bekapcsolásának, míg az egérrel mindig felülbíráható a botkormány-vezérlés.

5.1.2. A programrész működtetése

Mind a négy fénymegszakító vezérelhető az előlap segítségével (ki- és bekapcsolható, megmarad a beállított állapotban).

Nyomógomb segítségével engedélyezhető a botkormányos-vezérlés (lásd 16. ábra).

Ha engedélyezzük a botkormány-vezérlést, akkor fontos kiválasztani a „Select shutter for joystick control” legördülő menüből, hogy melyik fénymegszakítót vezérlem a tűzgombbal. Ekkor állítani lehet az átengedett lövések számát a „Number of shots to yield” szövegmezőben. Ez alapértelmezésben 10, a 0 lövésszámnak speciális jelentése van: ilyenkor a tűzgomb megnyomására a fénymegszakító egyszerűen átkapcsol anélkül, hogy utána visszaállna az eredeti állapotába.

Az „Emergency close” gomb megnyomásakor az összes fénymegszakító azonnal alapállapotba kerül. Ez akkor lehet különösen fontos, ha az átkapcsolás idejét túl hosszúra állították, és a lézer kárt okozhatna a kísérleti elrendezés elemeiben.

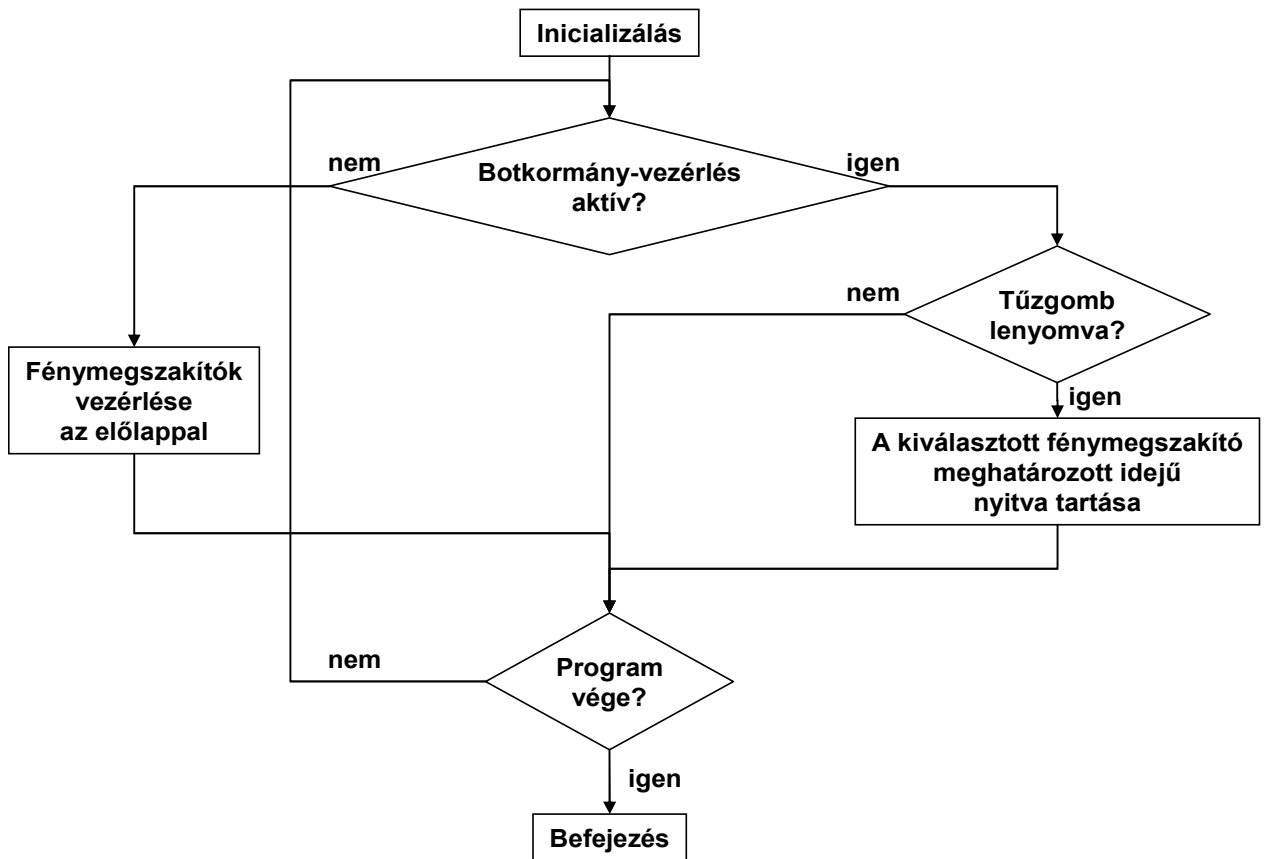
5.1.3. A fénymegszakító-vezérlés megoldásának elve

A ciklus felépítése a 15. ábrán található blokkdiagramon követhető nyomon. Mind a négy fénymegszakítónak megfeleltettem egy-egy Boole változót, melyek az előlapon kapcsolóként jelennek meg.

A fénymegszakítókat vezérlő mikrokontrollerhez alprogramot írtam. Ennek igaz-hamis változók formájában megadható a négy fénymegszakító kívánt állapota. Ezt a subVI-t hívom meg, amikor valamelyik fénymegszakítót kapcsolom.

A programrészlet minden egyes lefutás során ellenőrzi, hogy az előlapon keresztül módosították-e a fénymegszakítók beállításait. Ha igen, akkor az új beállításokat átadja a vezérlő mikrokontrollernek.

A program további futása botkormány-vezérlés engedélyezettségétől függ, mert ilyenkor a tűzgomb megnyomása esetén a fénymegszakító adott idejű átkapcsolása következik. Aktív botkormány-vezérlés esetén a botkormány tűzgombjának lenyomottságához tartozó logikai változó IGAZ értékére vár a programrész. Ezen a ponton a program leállna, és addig várna, amíg nem nyomják meg a tűzgombot. Ezért, ha nem nyomják le a gombot, a ciklus 10000-szeri lefutás után továbblép, majd ismét visszatér ehhez a ponthoz.



15. ábra A fénymegszakító-vezérlő programrész blokksémája

Gombnyomás után, a program még megvárja a következő triggerjelet a 4.4.2 szakaszban ismertetett módon, és csak ezután kapcsolja át a kívánt fénymegszakítót. Így pontosan akkor kapcsolja át a fénymegszakítót a program, amikor egy új impulzus érkezik, és nem akkor, amikor a felhasználó megnyomja a tűzgombot.

Ezután az adott impulzusszámhoz 0,1 s hosszúságú várakozás következik (mivel a lézer impulzusai 0,1 s-onként követik egymást), majd a fénymegszakító visszaáll a kiinduló állapotba.

0 impulzusszám esetén a tűzgomb lenyomása után a fénymegszakító átkapcsol, és az új állapotban marad a következő utasításig.

A nyalábirány-stabilizálás időnként lelassítja a program futását, itt viszont az időtartamok nagyon pontos betartása szükséges. Ezért, ha lenyomták a tűzgombot, akkor a program letiltja a nyalábstabilizálást a kritikus időtartamra.

5.1.4. A vészleállítás hardveres megoldása

Szükség van arra, hogy a lézerrendszerben a fényutakat akkor is el lehessen zárni, ha a kutató diszfunkcionalitást tapasztal. Ebből a célból egy vészgomb került beépítésre, mely megnyomásakor elzárja a fénymegszakítók tápfeszültségét, így lezárja a fényutakat.

Ezen kívül gyakran okozta az optikai elemek sérülését, ha a lézerrendszert pumpáló frekvenciakétszerezett Nd:Yag lézer móduskiválasztó egysége leállt, ekkor ugyanis megváltozik a nyalábdivergencia, és ezzel a fókuszpontok helye is. Ennek kivédésére a lézer használati utasításában foglaltak szerint a "Q-switch build up time" kivezetésen kell a kijövő feszültséget figyelni, illetve a feszültség túl nagy értéke esetén lezárni a fényutakat. (A kifejlesztett megoldás más paraméter megfigyelésére is adaptálható.) A vészleállító elektronikus kapcsolás - kis fogyasztása és mérete miatt - a fénymegszakítók vezérlő eszközbe került bele, annak a biztonsági transzformátoráról kap feszültséget, de saját feszültségstabilizátort tartalmaz zavarvédelmi okokból. A "Q-switch build up time" feszültséget (analóg jellege miatt) egy OP07 típusú precíz műveleti erősítőkel felépített Schmitt-trigger karakterisztikájú komparátor figyeli. A komparátor referencifeszültségét az előlapon lehet egy potenciométerrel beállítani. A helyes feszültség visszaállása után a fényutaknak egy előlapon lévő gomb megnyomásáig - a felhasználó jóváhagyása - még zárva kell maradniuk, ezért egy CD4001-es logikai NOR kapukból felépített SR-tároló is szerepel a kapcsolásban. A vészleállító, ha hibát észlel, a vészgombhoz hasonlóan a csapómotorok tápfeszültségét zárja el egy teljesítmény-MOSFET segítségével. Az előlapon LED-ek jelzik a bejövő feszültség helyes értékét illetve a fénymegszakítók állapotát.

5.2. *Adatmentés és naplózás*

5.2.1. Követelmények a programmal szemben

Áramszünet vagy a számítógép lefagyása esetén szükség van arra, hogy tudjuk, mik voltak az utolsó beállítások.

5.2.2. A programrész működése

A program futás közben fájlba menti a szükséges paramétereket. Bármely változás esetén a meglévő adatfájlhoz hozzáír egy újabb sort.

5.2.3. A megoldás elve

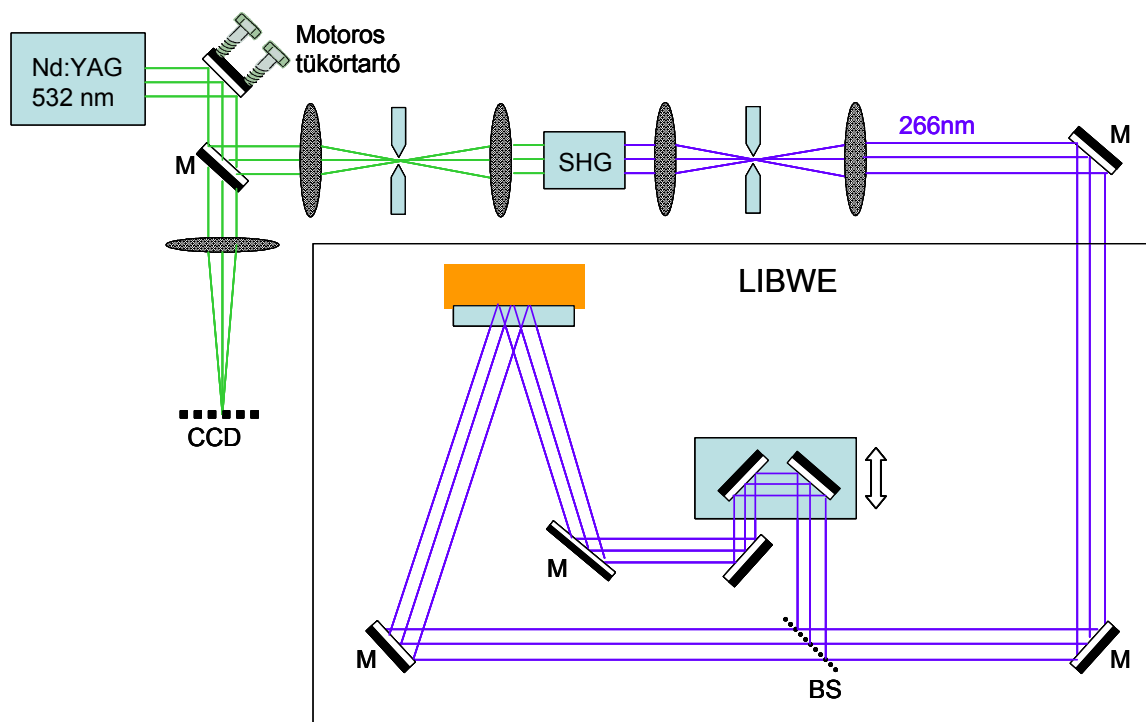
A mentett adatok rendre: a rendszerben más okból található két forgatómotor állapota (szögben), a fénymegszakítók állapota (ki- vagy bekapcsolt, 4 változó 0-1 értékekkel), az oszcillátor feszültsége (V). Minden egyes adathoz hozzárendeltem egy úgynevezett shift-regisztert. Ezzel a megoldással a ciklus minden egyes lefutásánál ellenőrizhető a változó értéke. Összehasonlítom a változó értékét az előző futásbeli

értékkel; változás esetén az új értéket üzenetben elküldöm magyarázattal kiegészítve, a LabVIEW beépített „Send Notification.vi” függvényét használva. Egy másik, a többivel párhuzamosan futó programrészben a „Wait for notification.vi” függvény várja a változásokról szóló üzeneteket. A program az üzeneteket azonnal egy szöveges fájlba menti új sorként, a sor elején a dátum és az idő szerepel. Az állományba mentés mellett a „Log” címkéjű programfülön megjelenik minden, az adott futás során keletkezett üzenet, szintén időponttal együtt, emellett a legutolsó üzenet a program kezelőfelülete alatt mindig látható. A rendszer rendellenes leállása esetén a labor munkatársai könnyen elérik a szükséges adatokat, és így nyomon tudják követni, hogy hogyan változtak a lézer beállításai. Ezek a fájlok a mérések dokumentálását is elősegíthetik.

6. Az irány-stabilizált lézernyaláb anyagtudományi alkalmazása

Amint a bevezetőben is említettem, a TeWaTi pumpalézerét önmagában is használjuk különböző anyagok illetve vékonyrétegek felületének lézeres marására [3,4,7]. Ezen kísérletek nagy térbeli homogenitású, nagy fluxusú ultraibolya fényimpulzusokat igényelnek.

A lézerfizikus-társadalomban közismert, hogy a villanólámpa pumpált Nd:YAG lézereknek általában inhomogén, koncentrikus gyűrűket tartalmazó nyalábprofilja van. A kívánt térbeli homogenitás érdekében térszűrés szükséges. Eredményes térszűrésnél az első lencse fókusz síkjában létrejövő diffrakciós gyűrűrendszernek csak a középső részét engedik át a túlyukon. A TeWaTi Nd:YAG lézere és a használt 1,5 m fókusztávolságú lencse esetén a diffrakciós gyűrűrendszer első gyűrűje viszont még elég intenzív volt ahhoz, hogy roncsolja a túlyukat. Ennek elkerülése végett az első diffrakciós gyűrűt is át kell engedni a túlyukon, minek következtében a nyalábprofil inhomogenitásának egy része megmarad. Ez a térbeli inhomogenitás a másodharmonikus-keltés folyamán nem csökken, sőt, valamelyest mélyül is. A kívánt térbeli homogenitás elérésére ezért szükséges a 266nm-es nyaláb térszűrése is (16. ábra).



16. ábra: Az iránystabilizált lézernyaláb alkalmazása LIBWE kísérletben

A térszűrőkben található tülyuk a nyalábirány elállítódása esetén (a nagy csúcsteljesítmény miatt) károsodik. A megsérült tülyuk további használata esetén pedig a térszűrő veszít hatékonyságából. Tehát a méréssorozatok reprodukálhatóságához, pontosságához feltétlenül szükséges, hogy a tülyuk ne sérüljön meg, azaz hogy a nyalábiránynak igen stabilnak kell lennie. (Bármely más, kisebb energiájú és térszűrőt is alkalmazó kísérleteknél is fontos az állandó nyalábirány, hiszen ott az eltérés a térszűrőn áthaladó fényintenzitás megváltozását okozva szintén rontja a kísérlet reprodukálhatóságát.)

A TeWaTi-ban kifejlesztett alkalmazásnál az első térszűrőben alkalmazott tülyuk átmérője 400 μm , az első lencse fókusztávolsága 1,5 m és a nyalábátmérő 9 mm. A két szomszédos diffrakciós gyűrű távolsága által megkövetelt iránystabilitás tehát 12 μrad . A lézer iránystabilitása önmagában a gyártó specifikációja szerint csak 0,5 mrad, de a megvalósított programmal sikerül a nyalábot az elrendezés által megkövetelt pontossággal irányban tartani. (lásd 4.6 fejezet) Ennek következtében céltárgyon a nyalábprofil és az energiát (közel) állandó értéken lehet tartani.

Egy ezt kihasználó anyagmegmunkálási kísérlet, a LIBWE (Laser Induced Backside Wet Etching) optikai elrendezésének vázlatát látható a 16. ábra alsó részén. A kísérletben az UV lézernyalábot kettéosztották, majd egy kvarclemez hátsó oldalán összeinterferáltatták. A fény áthatol a kvarclemezen, majd elnyelődik a naftalin-metilmetakrilát oldatban. A folyadék az interferencia-csíkrendszer világos részein azonnal elpárolog, és így nagyon kis (az interferáló nyalábok által bezárt szögtől függően szubmikrométeres, vagy akár 100 nm-es) rácsállandójú periodikus mintázatot „robbant” ki a kvarclemez hátsó felületéből. Az így kapott rácsok felületi minőségét atomi erő mikroszkóppal vizsgálják [3,7], míg a végső cél az így előállított rácsok szenzorikai alkalmazása.

7. Összefoglalás

A programfejlesztés alapjául szolgáló főbb célkitűzéseim a következők voltak: a lézernyaláb irányának stabilizálása, a fényutak könnyű és gyors elzárásának biztosítása, diszfunkcionalitás esetén vészleállítás, naplózás. Elért eredményeimet az alábbiakban összegzem.

- A kifejlesztett aktív nyalábirány-stabilizáló rendszer segítségével a nyaláb iránytartását 0,02 mrad-on belül tartom, ami a lézer saját specifikációját (0,5 mrad) jelentősen megjavítja.
- Fénymegszakítók használatával a lézerrendszer főbb fényútjai könnyen és gyorsan elzárhatók, illetve szabaddá tehetőek. A fénymegszakítók nyitva tartásának időtartama 0,1 s pontossággal beállítható.
- Diszfunkcionalitás esetén a hardveres vészleállítás működésbe lép, és elzárja a fényutakat.
- Az automatikus adatmentés és naplózás lehetővé teszi, hogy pontosan nyomon tudjuk követni a beállításokat. Ez segítséget jelenthet a számítógép lefagyása esetén; a beállítások gyors és pontos reprodukálása megkönnyíti a munka folytatását.
- Bemutattam az iránystabilizált lézernyaláb egyik konkrét alkalmazását, amikor az Nd:YAG lézer negyedik felharmonikusával végeztek anyagmegmunkálási kísérleteket. Az elrendezésben kétszeres térszűrést alkalmaztak a nagy homogenitású ultraibolya nyaláb előállításához.

A kitűzött célokat megvalósítottam. A programot azonban folyamatosan fejlesztem a felmerülő felhasználói igényeknek megfelelően, hogy minél inkább megteremtsem a laborban a biztonságos, pontos és kényelmes munkavégzés feltételeit.

8. Nyilatkozat

Alulírott *Jóárt Péter*, *fizikus* szakos hallgató, kijelentem, hogy a diplomadolgozatban foglaltak saját munkám eredményei, és csak a hivatkozott forrásokat (szakirodalom, eszközök, stb.) használtam fel.

Tudomásul veszem azt, hogy szakdolgozatomat/diplomamunkámat a Szegedi Tudományegyetem könyvtárában, a kölcsönözhető könyvek között helyezik el.

.....
Jóárt Péter

Szeged, 2009 Május 12.

9. Irodalomjegyzék

1. K. Osvay, A. P. Kovács, Zs. Heiner, M. Csatári, Zs. Bor, G. Kurdi, M. Görbe, J. Klebniczki, I. E. Ferincz: *A table-top high contrast TW laser system*, CLEO/Europe-EQEC, 2005, Munich, paper CG-13-TUE
2. Osvay K., Kovács A., Kurdi G., Bor Zs.: *Magyar Tudomány*, 2005/12., 1511-1516
3. Cs. Vass, K. Osvay, B. Hopp: *Fabrication of 150 nm period grating in fused silica by two-beam interferometric laser induced backside wet etching method* Opt. Expr. **14** (2006) 8354-8359
4. M. Csete, G. Szekeres, Cs. Vass, N. Maghelli, K. Osvay, Zs. Bor, M. Pietralla, O. Marti: *Surface plasmon resonance spectroscopy on rotated sub-micrometer polymer gratings generated by UV-laser based two-beam interference* Appl. Surf. Sci. **252** (2006) 4773-4780
5. Kovács A.: *Optikai elemek fázistulajdonságainak interferometrikus vizsgálata*, (PhD értekezés), 2000
6. <http://www.noise.physx.u-szeged.hu/digitalmeasurements/LabVIEWTutor/default.htm>
7. H. Tóháti, Á Sipos, G. Szekeres, A. Mathesz, A. Szalai, P. Jójárt, J. Budai, Cs. Vass, A. Kőházi-Kis, M. Csete, Zs. Bor : *Surface plasmon scattering on polymer–bimetal layer covered fused silica gratings generated by laser induced backside wet etching*, Appl. Surf. Sci. **255** (2009) 5130-5137

10.Köszönetnyilvánítás

Köszönetemet fejezem ki Görbe Mihálynak a gondos és figyelmes témavezetésért, Dr. Osvay Károlynak szakmai útmutatásáért, Dr. Gingl Zoltánnak és munkatársainak értékes tanácsaikért, a TeWaTi labor munkatársainak a segítségért és a türelméért. A diplomamunkám az OTKA T47078 és az NKFP 1/0007/2005 pályázatok anyagi támogatásával jött létre.